

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

В.М. Арндаренко, А.О. Семенов, О.М. Іванов

**ІНЖЕНЕРНІ ОСНОВИ БЕСПЕЧНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ЗЕРНА В
СИЛОСНІ СПОРУДИ**

МОНОГРАФІЯ

Друкується за рішенням Вченої ради Полтавського
державного аграрного університету
протокол №8 від 4 квітня 2026 р.

Полтава 2026

ББК40.729
УДК631.563:624.953:658.382.3
А80

Рецензенти

Професор, д. т. н., професор кафедри Агроінженерія
Державного біотехнологічного університету. м. Харків, Мельник В.І.
Професор, д. т. н., професор кафедри Будівництва та професійної освіти
Полтавського державного аграрного університету. М. Полтава, Ковальчук С.Б.

Друкується за рішенням Вченої ради Полтавського
державного аграрного університету
протокол №8 від 04 квітня 2026 р.

КДР'; 9:/839/: 9; 9/44/7

А80

Арендаренко В.М., Семенов А.О., Іванов О.М. Інженерні основи безпечного завантаження зерна в силосні споруди. Монографія. Полтава, 2026. 240 с.

В монографії фізико механічні властивості сипких зернових матеріалів, які надходять на зберігання в силосні споруди. Розглянуті питання які пов'язані із завантаженням силосів зерновим матеріалом з використанням різних видів пристроїв для зменшення травмування зерна. Виконані математичні моделювання руху зернового вантажу по робочим органам пристроїв призначених для зменшення ушкодження зерна при його завантаженні в силоси. Обґрунтована математична модель руху зерна у гравітаційно-каскадній установці. Проведені теоретичні дослідження руху зернового вантажу по різним поверхням пристроїв з обережного завантаження силосів зерном. Наведені інноваційні методи завантаження і розвантаження силосів зерновим матеріалом.

Монографія розрахована на широке коло науковців, спеціалістів та студентів інженерно-технологічних факультетів сільськогосподарського напрямку.

КДР'; 9:/839/: 9; 9/44/7

©Арендаренко В.М., Семенов А.О., Іванов О.М.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ВЛАСТИВОСТІ СИПКОВОГО ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ	10
1.1. Фізико-механічні властивості зерна.....	10
1.2. Сипкі сільськогосподарські матеріали.....	16
1.3. Стійкість зерна до механічних навантажень.....	19
1.4. Класифікація і методи визначення механічних пошкоджень зерна	25
РОЗДІЛ 2. СПОРУДИ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ.....	31
2.1. Класифікація зерноховищ	31
2.2. Металеві силоси для зберігання зернових культур	32
2.3. Способи завантаження ємностей зерном.....	41
2.4. Опис конструкцій завантажувально-розподільчих пристроїв	44
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ СИЛОСУ ЗЕРНОМ.....	78
3.1. Особливості функціонування силосних споруд	78
3.2. Процес функціонування транспортної системи завантаження силосів зерном на елеваторах	81
3.3. Математичне моделювання ударної взаємодії зерна об бетонне дно силосу	89
3.4. Математичне моделювання ударної взаємодії між окремими зернівками зернового потоку	94
3.5. Ударна взаємодію падаючої зернівки на нерухому основу.....	99
3.6. Математичне моделювання косого удару падаючої зернівки пшениці на нерухому основу.....	105
3.7. Компресійне ушкодження зерна в силосах	112

РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОБЕРЕЖНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ СИЛОСІВ ЗЕРНОМ.....	120
4.1. Загальні положення про гравітаційний рух при заповненні силосів зерновим матеріалом.....	120
4.2. Математичне моделювання руху зерна в спіральному гвинтовому каналі	121
4.3. Теоретичне моделювання процесу гравітаційного завантаження силосу зерном за допомогою відкритого гвинтового каналу.....	147
4.4. Математичне дослідження руху зерна по гвинтовій поверхні із різним кроком гвинта	155
4.5. Математичне моделювання руху зерна у гравітаційно-каскадній установці	158
4.6. Математичне моделювання взаємодії падаючого зерна на тороподібну поверхню	172
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ СИЛОСІВ ЗЕРНОВИМ МАТЕРІАЛОМ	188
5.1. Способи завантаження силосів сипким зерновим вантажем	188
5.2. Рух зернового вантажу по похилому лотку гравітаційної установки	195
5.3. Рух зернівок у полі сили тяжіння сховища	196
5.4. Гравітаційна установка з трьома кутами нахилу каналів	198
5.5. Математичне моделювання руху зернового вантажу в гравітаційній установці	199
5.6. Розрахунок геометричних параметрів гравітаційного пристрою	201
5.7. Дослідження руху зернового вантажу в гравітаційній установці з одним гальмівним каналом	204
5.8. Результати досліджень.....	209
5.9. Деформація силосів при вивантаженні зернового вантажу.....	212

ВИСНОВКИ.....	217
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	219
ДОДАТОК А	234

ВСТУП

Зернове господарство являється головною основою аграрного сектору України. Розширення виробництва зерна має забезпечити населення країни продуктами харчування, а також створити вагомий експортний потенціал, що дасть можливість підвищити економічну стабільність та незалежність держави.

Зерно у всьому світі являється одним із важливих продуктів харчування людей і тварин. Україна – одна із найбільших експортерів цього стратегічного продукту. За підсумками сезону 2024/2025 маркетингового року загальний експорт зернових та олійних з України склав 46,7 млн. тонн. Одночасно вимоги до якості зернової продукції щорічно посилюються. Особливо це стосується його збереження. Правильне зберігання, обережне транспортування забезпечує максимальну якість і цінність зерна, що знаходиться на зберіганні.

Для зберігання великих партій сухого і очищеного зерна на елеваторах використовують металеві силоси з плоским бетонним дном. На цих підприємствах всі технологічні операції по транспортуванню зерна до силосів повністю механізовані. Тому, при переміщенні зернового матеріалу до його завантаження в силоси зерно багаторазово контактує з робочими органами транспортних машин і при цьому можливе його ушкодження. Встановлено, що кількість травмованого зерна норіями може досягти до 12%, а рухомими елементами транспортерів до 2,5% [1,2,3]. Це означає, що при підході зернового вантажу до завантажувального отвору силосу деяка частина зернового вантажу уже має певний відсоток травмованого зерна.

Заповнення циліндричних ємностей (силосів) зерном або іншим сипким матеріалом на елеваторах є початковою ланкою всієї транспортної системи підприємства [4]. Як відомо, процес функціонування силосних сховищ включає такі технологічні етапи: завантаження, зберігання зернового матеріалу протягом певного часу та його розвантаження.

Завантаження силосів зерном здійснюється за допомогою різних транспортних машин. Робочі органи транспортних машин при взаємодії із зерновим матеріалом можуть зіпсувати деяку частину зерна. Дослідженнями

встановлено, що 1% травмованого зародку зернівки, при посіві такого зерна, знижує його схожість на 1%. Це означає, що від сівби до появи сходів не проростає 25%, а інколи і більше[1].

При завантаженні, особливо висотних, силосів зерновий вантаж падає із значної висоти. Таке падіння приводить до збільшенню відсотків травмованого зерна, особливо це збільшення спостерігається на початковій стадії завантаження. Крім того ударна взаємодія зерна об днище і стінки силосу може привести і до ушкодження зародка зернівки. Таке ушкодження негативно відображається і на посівну якість зерна. Так при вологості зерна в межах 14...16% гранична величина удару, при якому відбувається травмування, знаходиться в межах 0,11...0,16 Дж [1]. В цьому випадку польова схожість насіння знижується на 17...23%. Завантаження силосів гравітаційним способом приводить до появи сегрегації і ущільнення зернового насипу. Ущільнення зернової маси приводить до того, що зерно злежується, а як наслідок погіршуються харчові і технічні його якості. В той же час завантаження ємностей за допомогою вільного падіння зернового вантажу веде до зниження коефіцієнта використання її корисного об'єму.

Механічні і ударні ушкодження зерна робочими органами технологічних машин і механізмів негативно впливає на зерновий матеріал, котрий зберігається в силосах. Ушкоджене зерно менш стійке до зберігання в ньому відбувається більш інтенсивне дихання, і воно більше виділяє тепла та вологи[5,6,7]. Все це призводить до виникнення осередків самозігрівання зернової маси, що в свою чергу веде до псування зерна або до його повної загибелі.

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

Чисельними дослідженнями встановлено, що насіння, котре має високий

відсоток ушкодження, має гірші показники по його схожості. У статті [8] показано, що 30–40 % насіння зернових культур не дають сходів через мікропошкодження. Причиною цього є травмування окремих зернівок під впливом робочих органів зернозбиральних комбайнів, що приводить до зниження якості зернового матеріалу.

Для зменшення кількості травмованого зерна, особливо при завантаженні високих ємностей, необхідно використовувати спеціальні пристрої які встановлюються в середині силосів і призначені для зменшення ушкоджень зернівок зернового вантажу. Тому дана праця присвячена розробці, теоретичному обґрунтуванню та дослідженню роботи завантажувально-розкидуючих пристроїв.

РОЗДІЛ 1. ВЛАСТИВОСТІ СИПКОГО ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ

1.1. Фізико-механічні властивості зерна

Проектування та розрахунок робочих органів механізмів і машин, котрі задіяні у технологічному процесі завантаження зерновим матеріалом ємностей на сучасних елеваторах потребує попереднього технічного обґрунтування елементів їх конструкцій з урахуванням технологічних властивостей зерна. Ці властивості визначаються морфологічною будовою і фізико-механічними властивостями зерна і зернової маси в цілому.

Фізико-механічні властивості зерна вказують на його стан, будову та реакції на зовнішні сили які діють на нього. Фізичні властивості – це як правило його характеристики, котрі спостерігаються або вимірюються без перетворення однієї речовини на іншу. Механічні властивості зерна – це показники його здатності чинити опір навантаженням та деформаціям, що визначають його поведінку під час обробки, очищення зберігання та транспортування. Фізичні і механічні властивості зерна як правило розглядаються разом.

До фізико-механічних властивостей зерна відносяться: сипкість (здатність зернівок вільно рухатись одна відносно другої під час руху зернової маси); самосортування (розділення зернової маси за розмірами під час руху і падіння в сховища для зберігання); шпаруватість (наявність порожнин між зернами); сорбційні властивості (здатність поглинати пари та гази) та теплофізичні властивості (теплоємність, теплопровідність та термовологопровідність). Фізико-механічні властивості зерна, котре надходить на збереження, як правило не постійні і мають великий діапазон змін які залежать від багатьох факторів [9,10,11].

При довготривалому зберіганні великих партій зерна на сучасних елеваторах велике значення мають наступні механічні показники зерна: сипкість яка характеризується кутом природного укусу, тобто кутом, який утворюється між твірною конуса і його основою, при вільному падінні зерна у ємність

коефіцієнтом тертя; об'ємна вага є загальноприйнятим показником якості зерна; сорбційна здатність; аеродинамічні властивості (швидкість витання); геометричні розміри (довжина, ширина та товщина); щільність зернової маси (відношення об'єму міжзернового простору до всього об'єму зернової маси, яка виражається у частках одиниці або у відсотках); пружність зерна. Проте не всі вони в однаковій мірі впливають на механічне ушкодження зерна.

Найбільший вплив на ушкодження чинить форма зерна та стан його поверхні, розмірні (лінійні і вагові) показники, вологість, скловидність і щуплість. На механічне ушкодження зерна також впливають і фізичні властивості зернової маси, яка надходить на зберігання. До фізичних властивостей відносяться такі показники, як сипучість, гігроскопічність, вирівняність, теплоємність і теплопровідність.

Відомо, що зерно це складна біологічна система, складові якої мають різні механічні властивості, тобто здатність чинити опір руйнуванню з одночасною зміною форми. Форма і стан поверхні зерна бувають найрізноманітнішими, і, як правило вони для культури, виду і сорту різні [12,13]. Але навіть у межах одного виду, сорту форма і поверхня зерна може значно відрізнитись в залежності від умов розвитку рослин та інших факторів.

За формою все насіння поділяється на п'ять класів: куляста, в цьому випадку довжина, ширина і товщина зернівки практично рівні або незначно відрізняються (горох, сорго, просо і т.п.); овальна, коли ширина рівна довжині при значно меншій товщині (чечевиця); еліптична, коли товщина дорівнює ширині при значно великій довжині (соє та інше насіння бобових рослин); подовжена, коли всі три розміри відрізняються один від одного (пшениця, жито, ячмінь, кукурудза і т.п.); трикутна, коли всі три розміри рівні або відмінні один від одного, але розташування площин повинно бути трикутним (грачиха).

На рис.1.1 наведені основні типи насінні [14]. Попри те, що зерно деяких культур не мають правильної геометричної форми, перераховані вище групи форм зерна охоплюють більшу частину польових культур.

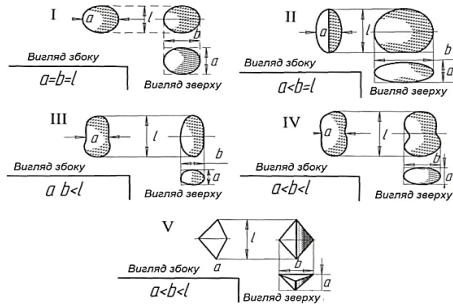


Рисунок 1.1 – Типи насіння за формою: I – кулеподібні; II – овальні; III – еліптичні; IV – подовжені; V – трикутні; a – товщина насіння; b – ширина; l – довжина.

Поверхня зерна може бути гладенькою та глянцевою, ребристою та шершавою, горбкуватою і зморшкуватою і т. п. Ці властивості дуже впливають на транспортування зерна, очищення та сортування і на механічне ушкодження зернівок робочими органами машин і механізмів.

Поверхня зерна залежить не тільки від властивостей даної рослини, але вона може змінюватись під дією зовнішніх умов, в залежності від того де рослина проростала [9].

До фізико-механічних властивостей зерна відносяться такі показники як розмір і крупність. Як правило крупність зерна змінюється в більшій мірі ніж його форми. Розмір зерна різних культур дуже різноманітний, коливання його посилюється під впливом індивідуальних особливостей кожної окремої рослини та зовнішніх впливів на неї. Розмір зерна визначається шляхом лінійних вимірювань (довжина, ширина, товщина). Довжина насіння зернових, зернобобових і технічних культур коливається в широких межах – від 1,8мм (просо) до 18мм (овес), олійних і технічних культур від 2,5мм (цукрові буряки) до 15мм (соняшник)[9,]. Встановлено, що довжина зернівок пшениці може бути дуже довгою > 9 мм, довгою – 8-9, середньою – 6-8, короткою – 5-6 і дуже короткою < 5 мм [9,15].

Ширина насіння зернових і зернобобових культур знаходиться в межах від 1,2 мм (просо) до 10 мм (кукурудза), олійних і технічних культур – від

1,7 мм (льон) до 8,6мм (соняшник). При цьому товщина насіння зернових і зернобобових культур може знаходитися від 1,0мм (просо) до 8,0мм (кукурудза, горох), олійних і технічних культур – від 0,5мм (льон) до 6мм (соняшник, соя).

Різноманітність насіння за розмірами, абсолютною масою та іншими ознаками пояснюється різними умовами живлення, забезпечення вологою, дозріванням й формуванням його на рослині, безумовно, сортом рослини.

Велике і дрібне зерно – це категорія розмірних показників, а важке і легке – показник його вагових характеристик.

В зв'язку з механізацією й автоматизацією процесів завантаження великих сховищ (силосів, металевих бункеріві вкладах) зерном необхідно правильно використовувати фізико-механічні властивості зерна. Так знаючи сипкість зернової маси можна повністю уникнути затрат ручної праці особливо при переміщенні зернових мас но́р'ями, конвеєрами та іншими установками які використовуються на сучасних елеваторах.

Великий вплив на ушкодження зерна яке переміщується і вільно падає у висотні ємності чинить властивість зернової маси втрачати свою однорідність. Ця фізична властивість зумовлюється сипкістю зернової маси і неоднорідністю твердих зернівок у зерновому вантажі. Самосортування при вільному падінні легких і твердих зернівок внаслідок того, що важкі зернівки (кукурудза, соя горох) маючи меншу парусність опускаються в сховище прямовисно і швидко досягають основи сховища або поверхні насипу. Дрібні, щуплі зернівки мають більшу парусність тому вони опускаються повільніше і накопичуються біля стін сховища або скочуються до поверхні конуса насипу. Найбільша критична швидкість у важкого зерна 16-17 м/с, у вівса, ячменю, пшениці і жита – 9-12 м/с, а у дрібного насіння трав і бур'янів – 0,5-3 м/с [9]. Самосортування зернової маси негативно впливає на довготривале зберігання зерна. Порушення однорідності партії зерна приводить до розвитку негативних фізіологічних і мікробіологічних процесів, що в свою чергу веде до самозігрівання зернових мас.

Велике значення на якісне зберігання зернової маси в силосах має шпаруватість зернової маси, тобто відношення об'єму міжзернового простору до загального об'єму, який займає вся зернова маса. Шпаруватість залежить від форми і розмірів зерен культури, стану поверхні зернівок, засміченості зернової маси та злежаності зерен у насипі.

Щільність злежаності зерен у насипі характеризується таким показником як насипна маса. В табл. 1.1 наведені значення шпаруватості та насипної маси зерен сільськогосподарських культур. Величина насипної маси зерен залежить від культури та вологості. Шпаруватість зернових мас, які знаходяться на зберіганні, сприяє передачі теплоти конвекцією, та переміщенню вологи крізь зерновий насип у вигляді пари. При тривалому зберіганні зернова маса ущільнюється, а її шпаруватість зменшується. Це явище необхідно враховувати при конструюванні засобів випуску зерна із ємностей.

Таблиця 1.1–Насипна маса і шпаруватість зерна різних культур [9].

Культура	Насипна маса, кг/м ³	Шпаруватість, %
Пшениця	730 – 840	35 – 45
Жито	680 – 750	35 – 45
Ячмінь	580 – 700	45 – 55
Овес	400 – 550	50 – 70
Гречка	560 – 650	50 – 60
Просо	680 – 730	30 – 50
Кукурудза	680 – 820	35 – 55
Рис	440 – 550	50 – 65

Під впливом вологи лінійні розміри зернівок змінюються. Так при підвищенні вологості дуже збільшується ширина на 10,8%, а товщина на 6,2%. Більш стійкою до дії вологи є довжина (на 5,2%) [16]. Встановлено, що мікропошкодження вологого зерна більші ніж сухого, це призводить до зміни розміру зародка, що в свою чергу сприяє збільшенню його пошкодження.

Маса 1000 зернівок помірно змінюється по культурах, але і в межах певних господарсько-ботанічних груп, це залежить від сортового розмаїття і ґрунтово-кліматичних та агротехнічних умов вирощування даної культури. Маса 1000 зернівок – один із найбільш стабільних показників у межах сорту [9].

Вирівняність зерна – ступінь однорідності окремих зернівок, що складають зернову масу за тим чи іншим показником. В табл.1.2 наведена абсолютна маса насіння окремих сільськогосподарських культур.

Таблиця 1.2 – Абсолютна маса насіння основних с.-г.культур [9].

Культура	Маса 1000зерен, г	Культура	Маса 1000 зерен, г
Пшениця	22 – 42	Рис	24 – 31
Овес	20 – 42	Просо	6,0 – 6,5
Жито	13 – 32	Горох	155
Кукурудза	205 – 345	Соняшник	53 – 65
Ячмінь	31 – 51	Гречка	235

При транспортуванні зернової маси до завантажувального отвору силосної споруди основним видом тертя, є тертя ковзання, яке оцінюється динамічним коефіцієнтом зовнішнього тертя. Динамічний коефіцієнт зовнішнього тертя для зерна пшениці, ячменю, кукурудзи по різних матеріалах становить від 0,3 до 0,5 [9].

Важливою характеристикою зерна є пружність. Пружність зерна залежить від його хімічного складу. Відомо, що насіння з великим вмістом білка має найбільшу пружність. Тому чим більша вологість зерна тим менша його пружність. Пружні властивості зерна характеризуються коефіцієнтом відновлення швидкості руху після удару зерна об тверду нерухому поверхню.

Так, коефіцієнт відновлення швидкості для сухого насіння гороху знаходиться в межах від 0,6 до 0,7, а для сирого насіння він майже в два рази менший [9].

Важливим фактором який визначає якість зерна котре надходить у сховища на зберігання є його вологість. Вміст вологи у зерні має велике значення у технологічному процесі завантаження силосів зерновим вантажем.

Характерною особливістю щойно зібраного врожаю зернових є значна нерівномірність вологи в окремих зернівках. Так в партії зерна пшениці із

середньою вологістю 17,7%, коливання вологості між окремими зернівками складає від 14 до 24% [11,18].

Таким чином, при конструюванні транспортних та завантажувальних пристроїв, встановленні їх технологічних регулювань і режимів робіт доцільно враховувати морфологічну будову і фізико-механічні властивості зерна.

1.2. Сипкі сільськогосподарські матеріали

Сипкий сільськогосподарський матеріал з фізичної точки зору – дисперсна двофазова система яка існує при певних співвідношеннях фаз. Кількісно це співвідношення можна оцінити коефіцієнтом щільності укладки зернівок. Даний коефіцієнт є основним параметром який характеризує сипкий зерновий матеріал як двофазну дисперсну систему:

$$K = \frac{V_T}{V} = \frac{\gamma}{\rho}, \quad (1.1)$$

де V_T – об'єм твердої фази, м³;

V – об'єм сипучого матеріалу, м³,

ρ – щільність твердої фази, кг/м³;

γ – об'ємна маса сипкого зернового матеріалу, кг/м³.

Величина коефіцієнта щільності укладання залежить від умов формування сипкого зернового матеріалу у циліндричній ємності. Для отримання стійкої структури, необхідно, щоб на кожну зернівку було накладено не менше шести зв'язків.

При заповненні циліндричних ємностей може бути два види завантаження гравітаційне і інерційне. При висоті насипу $H = 2,5 \dots 3$ м, як правило, використовується інерційний метод укладки. Для різних культур значення коефіцієнта щільності укладання наведений у табл.1.3.

Сипкі сільськогосподарські матеріали це статична сукупність окремих зернівок, випадкова орієнтація яких в просторі обумовлюється гравітаційними, фрикційними та між силами які виникають внаслідок дії рухомих зернівок одна на іншу. Цим матеріалам притаманні властивості які дають можливість за

відносно невеликих затрат механізувати практично всі технологічні процеси на елеваторі по переміщенню великих партій зернового вантажу.

Таблиця 1.3 – Значення коефіцієнта щільності укладання [9].

Культура	Значення коефіцієнта К
Пшениця	0,555 – 0,645
Овес	0,55 – 0, 64
Гречка	0,54 – 0,62
Ячмінь	0,495 – 0,595
Кукурудза (зерно)	0,555 – 0,615

Властивості окремих фаз сипкого зернового матеріалу можна описати їх параметрами, але природу властивостей сипкого зернового матеріалу котрий знаходиться у постійному русі описати значно складніше. Ці властивості – функція котра описує параметри фаз, і параметри статичного стану зернового матеріалу, можна представити у вигляді функціоналу:

$$\Phi_i = L_i(\langle x_i \rangle, \langle y_i \rangle), \quad (1.2)$$

де Φ_i – властивості сипкого зернового матеріалу;

L_i – оператор, який залежить від параметрів сипкого зернового матеріалу x_i і від параметрів твердої і повітряної фаз y_i .

На практиці використовують дві групи властивостей сипких матеріалів. До першої групи, які є основними, належать структурно-механічні, силові та фрикційні. Друга група характеризує процеси котрі відбуваються у сипкому матеріалі, розкриває їхні основні залежності та використовується для проведення технологічних розрахунків і створення методів контролю процесів, що відбуваються в сипкому матеріалі. До цієї групи належать електрофізичні, теплофізичні та аеродинамічні властивості.

Сипкі сільськогосподарські матеріали складаються із окремих частинок (тверда фаза). Тверда фаза характеризується наступними шістьма основними групами: вимірювані, структурні, фрикційні, теплофізичні, аеродинамічні, електрофізичні [20].

До першої групи входять параметри, значення яких визначають вимірюванням. До їх числа відноситься гранулометричний склад, який можна задати наступним законом розподілення:

$$df=(x_i)d_i. \quad (1.3)$$

Параметр x_i може приймати одне із значень: d – розмір, S – поверхня, m – маса зернівок. Враховуючи, те що зернівки у більшості реальних сипких матеріалів неправильної форми, тому необхідно ввести еквіваленти $d=d_e$, $S=S_e$, замінюючи при цьому реальне зерно кулею з масою M_e , яка рівна масі зернівки m_3 .

Структурні параметри твердої фази сипкого зернового матеріалу можна розглядати як параметри пружних тіл. Поведінка зерна при його завантаженні і зберіганні в ємностях, типу силос, різна. Так при падінні зерна на плоске дно ємності воно характеризується коефіцієнтом відновлення [21]. У насіпах при відносно невеликих тисках поведінку сипкого матеріалу можна повністю описати трьома параметрами: щільністю ρ , модулем Юнга E і модулем Пуассона μ .

Сипкі сільськогосподарські матеріали характеризуються наступними фізико-механічними властивостями: розмірами і формою зернівок; густиною; взаємною рухомістю зернівок; коефіцієнтом тертя; кутом природного укусу зернового вантажу [20].

Фрикційні властивості зерна в залежності від ступені дисперсності визначаються зовнішніми або молекулярними силами[22]. Параметри, які характеризують ці сили, діляться на дві великі групи:

- для великих зернівок ($d > 100 \mu\text{м}$) – коефіцієнт тертя спокою, коефіцієнт тертя руху;
- для дрібних зернівок ($d < 100 \mu\text{м}$) – статична та ударна сила відриву зернівок.

Характер передачі енергії в сипкому матеріалі значною мірою визначається силами тертя та зчеплення в місцях контактів його зернівок.

Гранулометрична характеристика твердої фази сипкого зернового матеріалу залежить від розмірів зернівок культури (l , b , a) і еквівалентного діаметра зернівок, який визначається так:

$$d_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{6V_T}{\pi}}, \quad (1.4)$$

Форма і

$$\Phi = \frac{S_T}{\pi(d_{\text{екв}})^2}, \quad (1.5)$$

де S_T – площа поверхні зернівки сипучого зернового матеріалу.

Фрикційні властивості ідеальних матеріалі, до яких відноситься зерно різних сільськогосподарських культур, визначаються коефіцієнтом зовнішнього і внутрішнього тертя та коефіцієнтом зчеплення.

При заповненні силосів зерновим матеріалом утворюється зерновий насип, тому для характеристики сипучого матеріалу у насипі вводяться коефіцієнти нарізності ε або пористості m . Для дослідження поведінки насипів краще всього використовувати коефіцієнт щільності укладання, для визначення цього показника необхідно знати щільність твердої фази та об'ємну щільність сипкого матеріалу (для пшениці $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$).

Коефіцієнт щільності укладання зернівок сипкого зернового матеріалу – величина не постійна і змінюється в залежності від умов формування сипкого матеріалу у силосній ємності, умов руху зернового потоку, та умов руху його на границях потоку і т.п.

Для коефіцієнта щільності укладки характерним є той факт, що при відносному переміщенні шарів сипкого матеріалу у насипі його величина в зоні зрушення набуває деяке постійне значення $K_{\text{кр}}$, котре знаходиться між мінімум і максимум. При цьому чим менший середній розмір зернівок, тим величина $K_{\text{кр}}$ стає ближчою до його мінімального значення.

1.3. Стійкість зерна до механічних навантажень

На елеваторних підприємствах робочі органи транспортних машин взаємодіють із зерновими матеріалами різних реологічних властивостей. При взаємодії зернового матеріалу з робочими органами транспортних машин на зерно діють всі види механічних зусиль: статичні тобто зусилля котрі

поступово зростають; динамічні, коли навантаження відбувається за допомогою ударів; знакозмінні, ці зусилля змінюються по величині або по величині і напрямку. Для зернових вантажів взаємодія з робочими органами характеризується розподілом зусиль взаємодії та зон контакту, які описується законами механіки.

У процесі збирання та післязбиральної обробки насіння піддаються механічним впливам (перетиранню, стиску, удару) робочими органами машин та транспортними пристроями. Кількість механічних пошкоджень зернового матеріалу робочими органами машин – результат двох факторів: дією на зерно робочих органів і природна міцність самого зерна.

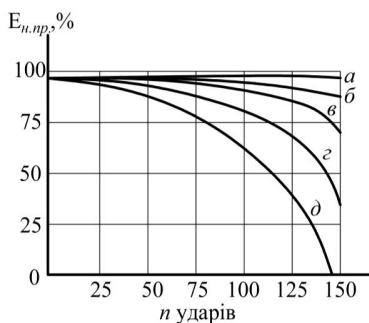
Дослідженнями зерна різних культур і сортів показали, що природна механічна міцність зерна коливається в дуже широких межах. Тому механічна міцність залежить від культури, сорту, вологості зерна і його розміру, виду механічного зусилля (удару, стиску, зрушення, тертя), положення зерна, виду матеріалу з якого виготовлені робочі органи транспортних машин. Тому, для одного і того ж робочого органу при однакових навантаженнях може бути отримана різна оцінка якості роботи транспортної машини в залежності від механічних властивостей самого зерна [23]. Найчастіше всього зернівки, зернового вантажу, на елеваторах піддаються ударним навантаженням, які можна розділити на дві групи.

До першої групи навантажень відносяться навантаження, які залежать від маси і швидкості або зусиль робочих органів транспортерів, які діють на зерно при його русі.

До другої групи відносяться всі випадки вільного удару, коли сила впливу визначається швидкістю і масою самого зерна (наприклад, удар зерна об кожух транспортера, удар при зменшенні зазорів між робочим органом норії і її верхнім корпусом і т. п.).

Від сильного механічного впливу зерно подрібнюється. Подрібнене зерно довго зберігатися не може. Однак решта цілого зерна після удару може втратити схожість ще до появи тріщин на їх оболонці.

На рис.1.2 наведений графік, який показує яким чином впливає удар на енергія проростання зерна пшениці різної вологості. Кількість механічних пошкоджень насіння зростає при багаторазовій ударній дії.



a) – 10%; б) – 15%; в) – 25%; г) – 30%

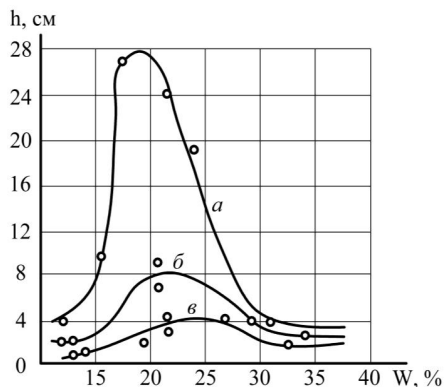
Рисунок 1.2 – Вплив удару на енергію проростання насіння при різній його вологості

Якщо механічна дія (по кількості ударів або величині швидкості) буде в 2...3 рази більша допустимої, тоді на поверхні зерна можуть з'явитися тріщини [24,25,26]. На рис.1.3 приведений графік залежності міцності зернівок пшениці, вівса і гороху від вологості. Міцність зерна характеризується висотою падіння гирі вагою 200 грам, при якій після удару на насінні з'являються тріщини. Величина ударних навантажень неоднакова для різних сільськогосподарських культур, а для зерна однієї культури залежить від вологості, найбільш міцне зерно, вологість якого близька до кондиційної.

Вимоги до зернової продукції яка знаходиться на довготривалому зберіганні з кожним роком посилюється. Зокрема великі вимоги ставляться до збереження товарної якості зерна. Тому правильне зберігання, бережне завантаження та вивантаження силосів зерном забезпечує максимальну якість і цінність зернових культур.

Ударні та механічні ушкодження зерна на елеваторах, особливо насіннєвого матеріалу, дуже небажане явище, оскільки збільшуються витрати

дорогого насіннєвого матеріалу, знижується його врожайність, товарна та споживча цінність зернавирощеного з ушкодженого насіння.



h – висота падіння вантажу; ω – вологість; a – горох; \bar{b} – жито; v – пшениця

Рисунок 1.3 – Зміна міцності насіння в залежності від його вологості

На елеваторах використовується різноманітне транспортне обладнання (ланцюгові транспортери, стрічкові транспортери, норії та гвинтові транспортери і т.п.). З літературних джерел відомо, що сумарний коефіцієнт бою, викликаний транспортним обладнанням складає 2,2% [3]. Найбільше пошкодження зерна припадає на норії. Розглянемо природу виникнення ушкодження зерна при завантаженні ковшів норій. Травмування зерна відбувається в результаті імпульсу, котрий виникає від різниці векторів напрямків кінетичної енергії зернівок і робочих органів норії. Якщо зерновий вантаж подається по ходу завантаження ковшів тоді ударні імпульси зменшуються на 20...30%, ніж при подачі матеріалу проти ходу ковша [3,7]. В наслідок чого ударні імпульси повністю гасяться при зіткненні з ковшем, і зерно практично не травмується.

Стрічкові конвесери являються важливим елементом елеваторного господарства. За допомогою їх відбувається подача зернового матеріалу до силосів короткотермінового і довготермінового зберігання зернового матеріалу.

Перевага стрічкових конвєсерів очевидна, але вони і мають недоліки. Перш за все це прямий контакт тягового органу із корпусними деталями, висока швидкість транспортування, сталеві скребки, попадання зернівок у сполучення приводної зірочки з тяговим ланцюгом та вертикальна подача зернового матеріалу. Всі ці недоліки приводять до того, що при роботі конвєсерів відбувається травмування зернівок із-за попадання зернового матеріалу у простір між ланцюгом і корпусом конвєсера [27].

На елеваторах широко використовуються гвинтові конвєсери які виконують транспортуючу роль. На рис.1.4 показаний рух зернового матеріалу у гвинтовому каналі. Виявлено, що із збільшенням частоти обертання шнека відбувається збільшення травмування зерна за рахунок їх інтенсивного тертя об рухомі і не рухомі поверхні конвєсера [28].

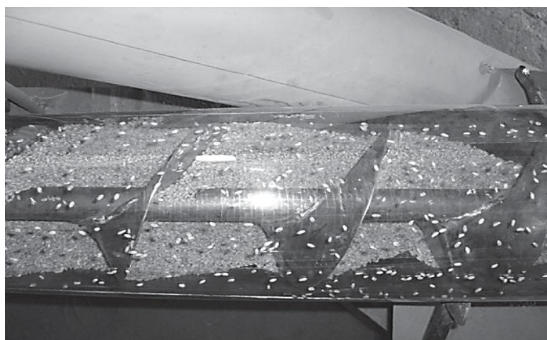


Рисунок 1.4 – Рух зерна у гвинтовому конвєсері.

Ефективність роботи гвинтових конвєсерів залежить від багатьох факторів, які залежать від умов в яких вони використовуються. Також слід зазначити, що конструктивні та кінематичні параметри гвинтових конвєсерів суттєво впливають на процес переміщення зернового матеріалу без його травмування. В статтях[28,29] вказується на те, що травмування зернового матеріалу залежить від параметрів гвинтового конвєсера, тобто від зазору між шнековим робочим органом і його кожухом. На рис.1.5 показані місця травмування зернівок гвинтовим робочим органом конвєсера.

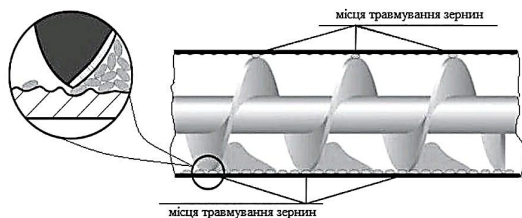


Рисунок 1.5 – Взаємодія шнека конвеєра із зерном.

В пошуках шляхів зниження коефіцієнта бою зерна в компанії ГП «Зернова Столиця» [3] були проведені досліді по встановленню як швидкість транспортування тяговими органами транспортерів впливає на приріст бою зерна (рис.1.6). Виявлено, що пляма контакту продукту з тяговим органом повинно бути мінімальним. Для досягнення цієї умови необхідно зменшити ширину конвеєра, при цьому збільшити його висоту для того, щоб зерновий шар був вище а опір з тяговим органом був мінімально допустимим, що позитивно впливає на якість транспортує мого зернового матеріалу.

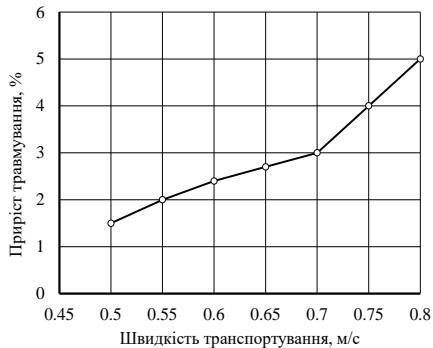


Рисунок 1.6 – Залежність приросту травмування зерна від швидкості його транспортування стрічковим транспортером.

Залежно від форми, розмірів, структури і стану покривних оболонок зерно ушкоджується по різному. Механічні та ударні пошкодження, особливо насінні, знижує його схожість внаслідок ушкодження зародка та ураження

пошкодженого насіння бактеріями, грибками, кліщами та іншими хворобами і шкідниками.

Виявлено, що травмування пшениці до 10% приводить до зниження врожайності на 1 ц/га, в свою чергу пошкодження зародка веде до зниження врожайності зерен колосових культур на 7,1 ц/га, тоді як врожайність дуже пошкодженого насіння не перевищує 13,9 ...15,3 ц/га [7].

Підчасзберігання пошкодженого зерна у силосахможуть відбуватися значні втрати від інтенсивного дихання, активної дії бактерій, грибків, кліщів та інших негативних явищ [24]. Тому всі силосні споруди оснащуються активною системою вентиляції.

1.4.Класифікація і методи визначення механічних пошкоджень зерна

Механічні пошкодження зернового матеріалу, котрий надходить на довготривале зберігання, суттєво впливають на його лежкість, схожість та вихід готової продукції при переробці.

Механічне пошкодження зерна можна розділити на триосновні групи за масштабом та характером деформації: мікротравмоване,макротравмоване та макропошкоджене тобто бите зерно. Між макротравмованим і мікротравмованим зерном існує відмінність, суть якої полягає в тому, що роздроблені (вздовж і поперек),роздавлені або плющені і обрушені зерна за своїми фізико-механічними показниками (розміру, масі, формі) і аеродинамічними показниками значно відрізняються від цілих, і тому більшість з них можна легко відокремити на зерноочисних і сортувальних машинах.

Макротравми видно неозброєним оком, але такі зерна не розколені на частини. Це можуть бути глибокі тріщини оболонки, вм'ятини або часткове здирання плодкових оболонок.

Мікротравмовані зерна не мають таких відмінностей, і їх не можна відокремити від непошкоджених, тому що у них відбувається пошкодження внутрішніх тканин або в них появляються мікроскопічні тріщини оболонок, які неможливо побачити без спеціального обладнання. Внутрішні тріщини з'являються не лише від механічних пошкоджень або удару, а й від різкої зміни

температур під час дозрівання або сушіння. Мікротравми виникають в місцях прикріплення ніжки, при надриві оболонки зародка та появі «синців». «Синці» з'являються від лопання внутрішніх клітин під час завдання удару недозрілій або з великою вологістю у зернині та при падінні зернівок з висоти на бетонне дно силосу. Такі травми підвищують інтенсивне дихання зерна у 2 рази та вразливість його до дії мікроорганізмів у 10...12разів [30]. На сучасних зерноочисних і сортувальних машинах такі ушкоджені зернівки неможливо виявити, та відрізнити їх від непошкодженого зерна.

Бите зерно (макропошкоджене) має повне або часткове руйнування цілісності зернівки. Такі зернини можуть бути роздробленими, з відбитими частинами ендосперму, сім'ядолі або зародка.

Під дією динамічних і статичних навантажень, які виникають при завантаженні і розвантаженні зернового матеріалу із силосів, зерно чинить відповідний опір руйнуванню і травмується. Дослідженнями встановлено, що при збільшенні деформації зернівок озимої пшениці від 0,1 до 0,5 мм їх травмування збільшується від 0,5 до 13,7% [31]. При цьому лабораторна схожість зернівок озимої пшениці при її деформації 0,1 мм знижується приблизно на 6,4 %, а при деформації 0,5 мм на 34,7 % [31].

Залежність зміни схожості і травмування зернівок озимої пшениці від величини її деформації представлена на рис. 1.7.

Із приведеного графіка видно, що деформація зернівок залежить від сил які діють на зернівки озимої пшениці і їх вологості. Значить, що для отримання високоякісного посівного насіння необхідно, щоб деформація зернового матеріалу, який надходить на зберігання у силоси, була мінімальною.

Ступінь травмування дуже залежить від фізико-механічних і біологічних властивостей насіння, це значить що різні культури при завантаженні їх на зберігання у силоси можуть ушкоджуватись по різному. В статті [32] вказується, те що серед зернових культур найбільшою мірою ушкоджується кукурудза потім ідуть жито, пшениця м'яка, ячмінь і пшениця тверда.

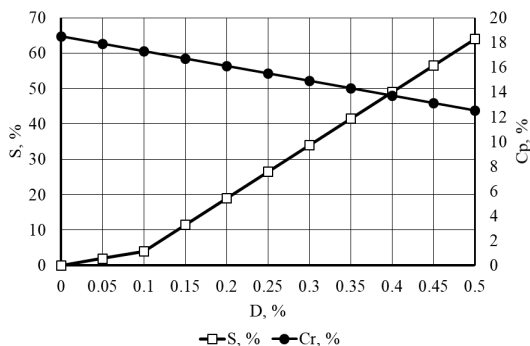


Рисунок 1.7 – Залежність зміни схожості і травмування озимої пшениці від величини її деформації

Зерно, яке надходить на зберігання до елеваторів окрім механічних травм може зазнавати і теплових ушкоджень від надто інтенсивного сушіння. При завантаженні силосів зерновим матеріалом необхідно пам'ятати, що рівень ушкодження робочими органами машин і механізмів елеваторів різко зростає, якщо насіння надто сухе або, навпаки вологе. Виходячи з цього рекомендовано проводити роботи по збереженню за вологістю зернових культур 14...20 %, кукурудзи 12...22% [33].

Для підвищення посівних якостей насіння кукурудзи в роботі [33] рекомендується проводити хімічне передпосівне протруювання травмованого насіння, що дає можливість, як вказують автори, підвищити польову схожість на 12...32%, а врожайність кукурудзи на 15,4...26,3 %, порівняно з необробленим насіннєвим матеріалом. З метою зменшення рівня травмування зерна необхідно застосувати низку заходів – сушіння кукурудзи виконувати при м'яких температурних режимах, проводити менш інтенсивне сепарування, на елеваторах, по можливості, зменшити переміщення зернових мас норіями і транспортерами.

На рис.1.8 наведена класифікація механічних пошкоджень зерна колосових культур. Дана класифікація враховує фізико-механічні властивості

зерна, котре надходить на елеватор для зберігання і відображає всі можливі види пошкоджень зерна.



Рисунок 1.8 – Класифікація механічних пошкоджень зерна.

Для оцінки якості роботи транспортерів і характеристики зернової маси необхідно визначити мікро- і макротравм зерна. Механічні пошкодження зерна можна визначити різними методами, від простих візуальних до високотехнологічних з використанням неруйнівних інструментів.

До традиційних методів визначення пошкоджень відносяться: органолептичний, метод фарбування і біологічний [34].

При органолептичному методі візуально з використанням лупи або мікроскопу визначається кількість макротрамованого зерна, яке вручну виділяється з наважки. Інколи найбільш дрібні мікротрамовані зернівки залишаються непоміченими, тоді з метою виявлення всіх пошкоджень зерно фарбують, такий прийом дає можливість встановити приховані травми та тріщини в ендоспермі. Для фарбування зерна використовують «швидкий зелений» FCF або й йод, який забарвлює лише оголений крохмаль у місцях пошкодження оболонки.

Органолептичний метод дає можливість швидко і з великою точністю визначити не тільки загальну кількість макротрамованих зернівок, але й

класифікувати їх по типам травм. Даний метод не дає можливість визначити загальну кількість прихованих внутрішніх пошкоджень зернівок, їх можна встановити лише непрямим шляхом, за величиною зниження схожості. Такий метод не є універсальним і має суттєвий недолік, котрий полягає в тому, що він дає тільки відносні значення кількості мікротравм зернівок у партії, а зниження схожості може бути і зрізних причинах. Крім того, цей метод не дає можливість встановити типи мікротравм окремих зернівок.

Біологічний метод дозволяє також встановити вплив різних типів мікротравм на посівні і продуктивні якості насіння шляхом порівняльної оцінки енергії проростання, лабораторної або польової схожості, сили початкового зростання, повноти появи сходів, біометричних показників (висота, вага), врожайність зерна та рослинної маси.

Крім традиційних методів використовуються і сучасні та інноваційні методи. До них відносяться: комп'ютерний зір та штучний інтелект (ШІ), гіперспектральний аналіз, рентгенографія та томографія і акустична емісія.

При комп'ютерному зорі та ШІ використовуються камери високої роздільної здатності та нейромережі для автоматичного розпізнавання та класифікації пошкоджень зернівок на конвеєрних стрічках.

Гіперспектральний аналіз дозволяє виявити приховані внутрішні тріщини та вогнища псування за спектральними характеристиками відбитого світла.

Найточнішими методами по виявленню внутрішніх мікротріщини без руйнування зернівки являються методи в яких використовується рентгенографія та томографія.

Наступним методом, за допомогою якого визначаються мікротравми, є метод фіксації звукових хвиль, які виникають при деформації або розтріскуванні зерна під навантаженням. Даний метод поділяється на: ультразвукову дефектоскопію (активний метод), акустичну емісію (пасивний метод) та лазерно-ультразвукову діагностику.

При активному методі діагностики крізь зерно пропускають високочастотні звукові хвилі. Коли звукова хвиля зустрічає мікротріщини

(порожнину або шар повітря в середині зерна) вона відбивається або розсіюється, оскільки повітря має інші акустичні властивості, ніж тканини зерна. Датчики, які знаходяться в приладі фіксують відлуння або зміну амплітуди та швидкість хвилі, що пройшли наскрізь. Наявність тріщин значно послаблює сигнал, який фіксується приладом.

При пасивному методі реєструються звукові мікроімпульси, які виникають у самому зерні. Утворення або розширення мікротріщини супроводжується вивільненням енергії у вигляді пружних сил. Чутливі датчики приладу фіксують ці мікротріщини.

Лазерно-ультразвукова діагностика призначена для виявлення внутрішніх пошкоджень зерна [35,36]. В цьому методі використовується лазерний імпульс, який необхідний для створення акустичної хвилі всередині зерна без прямого механічного контакту.

У всіх цих методах спеціальні прилади аналізують час проходження хвиль крізь зерно, та їх затухання. Сучасні системи використовують алгоритми машинного навчання для порівняння отриманих звукових «відбитків» зі зразками цілого та пошкодженого зерна (спектральний аналіз).

Для звукової діагностики мікротріщини зерна використовуються ультразвукові дефектоскопи (наприклад, серії УД або аналоги від Novotest, Grow-Technique), акустичні аналізатори (прилади, які вимірюють параметри пружності зерна), системи акустичної емісії (АЕ), провідними виробниками такого обладнання являються фірми MistrasGroup та VallenSysteme (за допомогою цих систем можна виявити виникнення тріщин в реальному часі).

РОЗДІЛ 2. СПОРУДИ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ

2.1.Класифікація зерносховищ

Для якісного зберігання великих партій зерна, особливо насіння, використовують спеціальні зерносховища, в яких найбільш ефективно враховуються фізичні та фізіологічні властивості зернового матеріалу.

Зерносховища класифікуються за багатьма ознаками: за способом зберігання, за матеріалами, з яких вони виготовляються, за ступенем механізації всіх технологічних операцій (механізовані, напівмеханізовані, немеханізовані), за наявністю і типом установок для активного вентилявання зерна (канальна, підлогова, переносна та ін.), за терміном зберігання та за розміром у просторі [37-40]. За матеріалом зерносховища поділяються на залізобетонні, металеві, цегляні, рідше – скловидні та дерев'яні. Крім того, зерносховища можуть бути циліндричні, квадратні і конусні, а за типом дна плоскі або конусоподібні. Зерносховища за формую можуть бути вертикальні і горизонтальні, а за призначенням для зберігання зерна, борошна та сипучих матеріалів. У зерносховищах зерно може зберігатись тимчасово, від кількох діб до одного місяця, тривало, один або три місяця, і довго тривало, більше 30 днів.

Під час тимчасового зберігання зерно знаходиться під навісом, у буртах. Даний спосіб зберігання використовується у період масового збирання зерна.

Для довготривалого зберігання зерна використовують елеватори. Вони забезпечують очищення, сушіння з максимальною ефективністю і найкращим збереженням зерна. На відміну від складів із стаціонарною механізацією, елеватори являються компактним підприємством. Компактність елеваторів досягається завдяки великій висоті споруд. Елеватор найбільш досконале зерносховище яке повністю механізоване, у якому мало використовується ручна праця, краще використовується будівельний об'єм, менші втрати зерна, краща ізоляція від зовнішнього середовища, та менша площа забудови [41,42]. Крім того елеватори мають надійну та безпечну систему захисту від виникнення пожеж, а також захист від гризунів. Встановлена в них система

вентиляції з прийнятним мікрокліматом, призначена для зберігання максимально великої кількості запасів зерна без втрати його продовольчої та харчової цінності.

Елеватори за обсягами зберігання зернового матеріалу поділяються на малі, середні і великі. До малих відносяться зерносховища на яких одночасно в стаціонарних ємностях зберігається до 10 тис тон зернових або олійних культур. Середніми елеваторами являються підприємства у яких одночасно може зберігатись від 10 до 50 тис тон зерна. На великих елеваторних підприємствах одночасно може зберігатись від 50 до 100 тис тон зерна і більше.

До основних споруд елеваторів відносяться: робоча вежа, силосний корпус, приймальні та відпускні пристрої. У робочій вежі розміщені: норії, ваги, зерноочисні машини, самопливне і аспіраційне обладнання, приводні та натяжні станції транспортерів елеватора. В сучасних елеваторах зерновий матеріал зберігається у металевих силосах.

2.2. Металеві силоси для зберігання зернових культур

Металеві силоси для зберігання зерна – це зварні або збірні металеві ємності, які оснащені обладнанням для вентиляції та пошарового контролю температури зернового матеріалу. Основна перевага таких силосів полягає в тому, що вони мають високий рівень будівництва і експлуатації, повну механізацію завантажувально-розвантажувальних робіт та широкий типорозмірний ряд. До недоліків металевих силосів слід віднести по перше те, що під дією зовнішніх і внутрішніх факторів відбувається корозія металу, тому необхідно проводити регулярний догляд за металевими конструкціями, по друге під час експлуатації в середині ємностей може відбуватися конденсація вологи (необхідна теплоізоляція), по третє при завантаженні і розвантаженні силосів відбувається травмування зерна, по четверте стінки силосу отримують високий горизонтальний тиск під час вивантаження зерна [43,44].

Використання металевих силосів для зберігання зерна запобігає знищенню його птахами і гризунами. Якісно виконаний силос є герметичною

емністю, котра захищає зерновий матеріал від несприятливих атмосферних впливів. При повному завантаженні силосу сухим і очищеним зерном у перші місяці спостерігається процес самоконсервування зернового матеріалу, і як наслідок живі компоненти переходять в анабіотичний стан. Тому втрати в масі зерна не перевищують нормативних норм.

Вертикальні металеві силоси можуть бути: прямокутними виготовленими зі сталевих гофрованих панелей; прямокутними виготовленими із гладких панелей; із плоским бетонним дном; з конусним дном; циліндричні із гофрованих панелей на болтових з'єднаннях, циліндричні із гладких панелей на болтових з'єднаннях; спіральні-фальцові силоси.

На елеваторах встановлюють вертикальні силоси. Вони поділяються на прямокутні та циліндричні. На рис. 2.1 приведені основні види металевих силосів.

Прямокутні силоси класифікуються за видом стінок, дна та покриття. Перший тип – прямокутний силос виготовлений зі сталевих гофрованих панелей (рис.2.1,а) [45]. Другий тип – прямокутний силос, котрий виготовляють з гладких сталевих панелей (рис.2.1,б). Прямокутні силоси з точки зору використання площі являються найбільш ефективними. Вони використовуються, як правило, як проміжне сховище, в технологічному процесі.

Циліндричні силоси класифікуються за видом дна, стінки та покриття. Розрізняють силоси з плоским і конусним дном [45].

Силоси з плоским дном (рис. 2.1,в) призначені для довготривалого зберігання сухого й очищеного зерна (кукурудзи, пшениці, ячменю та ін.). Така конструкція встановлюється на бетонній основі із застосуванням пальових фундаментів або на щелепній основі, це залежить від геологічних умов місцевості.

Бетонні силоси. Ці силоси дуже надійні та довговічні, але дуже дорогі при їх будівництві.

Полімерні силоси. Використовуються в полімерних рукавах для зберігання зерна.



а

б



в

г

д



е

ж

а – прямокутний зі сталевих гофрованих панелей; б – прямокутний із гладких панелей; в – із плоским дном; г – з конусним дном; д – круглий із гофрованих панелей на болтових з'єднаннях; е – круглий із гладких панелей на болтових з'єднаннях; ж – спірально-фальцевий силос.

Рисунок 2.1 – Види вертикальних металевих силосів [39].

Силоси-роздавачі. Призначені для дозування та роздачі матеріалів.

Конструкція силосів забезпечує стабільну експлуатацію, та їх якісне технічне обслуговування. Основними технічними характеристиками силосів являються їхні розміри (діаметр, висота), об'єм (від кількох до тисяч кубічних метрів), матеріали (оцинкована сталь), конструктивні особливості (плоске/конічне дно, дах, каркас) та комплектацію (системи вентиляції, датчики температури/рівня), що забезпечують безпечне зберігання зерна.

На рис.2.2 представлені силоси з плоским дном які знаходяться на Полтавщині. Такі силоси оснащені активним вентиляванням, каркас яких виконаний із гофрованої сталі.



Рисунок 2.2 – Силосні споруди з плоским бетонним дном.

Силоси з конусним дном призначені для повного гравітаційного розвантаження.

Опорна частина такого силосу виготовляється із металевого профілю, котрий сприймає всю вагу силосу і продукту який знаходиться в ньому. Завантаження і розвантаження продукції в силосах з конусним дном здійснюється через центральні отвори у верхній і нижній частині [46].

Циліндричні металеві силоси в залежності від різновиду їх стінок можуть бути: суцільнометалеві, із гофрованих панелей на болтових з'єднаннях, із гладких панелей на болтових з'єднаннях, спірально-фальцевий силос.

Суцільнометалевий силос використовується для зберігання борошна, цементу. Об'єм їх знаходиться в межах від 60 до 70 м³.

Силоси, які виготовляються із гофрованих панелей і збираються за допомогою болтових з'єднань (рис. 2.1, д), використовуються для зберігання зернового матеріалу об'ємом 100-15000 м³. Вони призначені для довготривалого зберігання зернового матеріалу. Гофровані панелі таких силосів підвищують міцність і жорсткість стінових панелей у випадку поперечного згину. Крім того, гофровані панелі характеризуються конструктивною анізотропією властивостей, оскільки характеристики жорсткості, вздовж і поперек гофри значно відрізняються. Зокрема, момент інерції в горизонтальному напрямку більший у 70 разів за вертикальний, а момент опору – в 9,7 рази, ніж у вертикальному напрямку [38].

В останні десятиліття спостерігається тенденція зведення силосних корпусів із гофрованої оцинкованої і емальованої сталі для зберігання зернових вантажів (рис. 2.3). У силосах подібних конструкцій забезпечується: рівномірне завантаження по щільності насипу зернових вантажів; механізоване перевантаження з будь-якого силосу у будь-який інший силос блоку, рециркуляція в одному силосі; виключення конденсації вологи на внутрішній частині; режим аерації зерна в будь-якій комбінації силосів; енергозбереження при вивантаженні зернових вантажів; механізоване до завантаження зернових вантажів (при наземному виконанні); автоматизація, контроль граничного завантаження зі звуковою сигналізацією; електронний контроль температури насипу в силосах з центрального пульта в диспетчерській зі світловою індикацією граничних режимів і цифровим архівом; виключення попадання в порожнину бункерів силосів атмосферних опадів, птахів і гризунів; можливість технічного обслуговування аераційних і вивантажувальних систем при порожньому силосі і ручної доочистки днища.



Рисунок 2.3 – Силосні корпуси з оцинкованої сталі.

Силоси із гладких панелей на болтових з'єднаннях (рис.2.1,е) використовуються для зберігання сипучих матеріалів. Такі силоси зазвичай виготовляють із конусним дном, об'єм яких обмежений і може бути від 25 до 550м³. Для забезпечення жорсткості при використанні таких типів силосів необхідно збільшувати товщину металу оболонки. При цьому на різних ярусах силосу установлюються стінові панелі в порядку зменшення їх товщини знизу вгору.

Спірально-фальцові силоси (рис.2,1,ж), це силоси які монтуються без використання болтових з'єднань. Для кріплення металевих панелей застосовується технологія подвійного фальцювання сталевих стрічок(рис. 2.4). Така конструкція надає силосу додаткову горизонтальну жорсткість та герметичність при мінімальних витратах металу.

Металеві силоси з плоским дном типу «SPA», які виготовляє Польська компанія Unia, призначені для зберігання зернових, олійних, бобових культур і гранульованих продуктів. Діаметр циліндричної частини силосу складає від 6 до 31,8 м, а місткість від 96до 15660тон (по пшениці). Силоси типу SPA 22,5/19 мають такі технічні характеристики: загальний об'єм ємності складає 9734 м³, корисний – 9724 м³, вантажомісткість 7585 тон, повна висота силосу

складає 29,36 м, річна витрата електроенергії 16500 кВт/год, річні затрати праці (при зберіганні 6 місяців) 2160 год., затрати на електроенергію 1850 грн [47].

Плоскодонні силоси, котрі виготовляються із гладкого металевого листа в середині мають певні переваги над іншими. Гладка внутрішня поверхня стінок силосу запобігає зависанню зерна, що в свою чергу полегшує його вивантаження.

Для зберігання великих партій зернового матеріалу в силосах необхідно щоб температура в силосах знаходилась в межах від 5 до 10 C⁰. При підвищенні температури понад 15...20C⁰ різко зростає ризик розвитку шкідників. Для тривалого зберігання пшениці та кукурудзи оптимальною є вологість 12...14%; для олійних культур 6...8% [48].







Рисунок 2.4 – Спірално навивний силос фальцьованими стиками.

Силоси розміщуються безпосередньо на легких незаглиблених фундаментах або на опорах з конусним дном. Комплексні сховища, представлені в табл.2.1, можуть комплектуватися сушильним устаткуванням на газі, рідкому і твердому паливах, очисними цехами, міні-заводами з переробки зерна, виробництва борошна, масла, спирту тощо, будь-якої місткості і структури від 500 до 30000 тон і більше.

Металеві силоси зводяться із застосуванням різних прийомів під час проведення будівельно-монтажних робіт. Перші металеві силоси зводилися шляхом з'єднання окремих металевих листів за допомогою електрозварювання

по тимчасовому каркасу. Такий спосіб зведення силосів відрізняється високою трудомісткістю.

Таблиця 2.1 – Типи зерносховищ місткістю від 500 до 30000 т і більше

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

В даний час використовуються більш прогресивні способи зведення металевих силосів: перший розгортаються рулони листової сталі з подальшим закріпленням до заводської готовності на несучому каркасі (метод рулонування); другий це метод спіральної навивки, коли стіни силосу утворюються навивкою сталевую стрічкою та з'єднанням її у фальц. Найбільше розповсюдження в даний час отримали силоси стіни яких виконані із гофрованої сталі, це збільшує міцність конструкції і знижує її вагу відносно аналогічних силосів, котрі зводяться із листової сталі.

Основною частиною корпусу будь-якого силосу є каркас, який виготовляється із міцних марок сталі та покривається шаром оцинковки $600\text{г}/\text{м}^2$. Так, наприклад, в силосах торгової марки Ріля Україна корпус має хвилясту структуру панелі яких виготовляються із високоякісної бельгійської сталі марки *ArcelorMittal S 550 GD Z 600*, та скріпляються болтами класу міцності яких 8,8/10,9/12,9. На корпусі силосу встановлюються сходи, та спеціальні пристрої для відбору проб сировини.

В Полтавській області випускаються силоси з плоским днищем на заводі у місті Лубни. Завод випускає металеві силоси для вивантаження універсальні з плоским днищем (У13-МСВУ. ПД). Об'єм таких силосів коливається від 356 м^3 до 3102 м^3 . Силос марки НСВУ. 92.хх.В12 має об'єм від 356 до 1268 м^3 , а силос марки МСВУ. 129.хх. В12– 1313 – 3102 м^3 [49].

Силоси торгової марки МСВУ з плоским дном швидко збираються, ємність оснащена системою повітропроводів і примусової вентиляції, корпус виготовлений із високоякісної міцної сталі, дах силосу може витримувати велике снігове навантаження (до $180\text{ кг}/\text{м}^2$), основа – залізобетонний фундамент, силос оснащується датчиками контролю рівня зерна і терморегуляції, який фіксує температуру на певному рівні ємності.

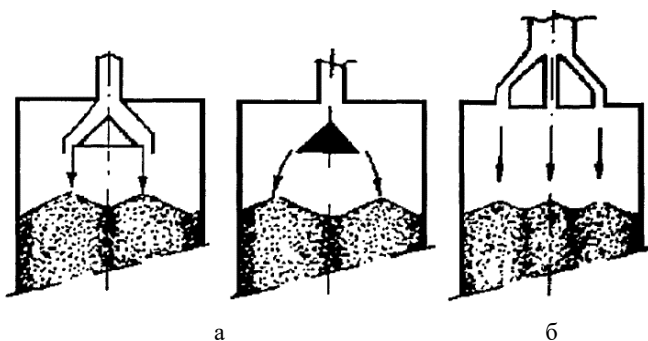
В таких силосах можна зберігати від 40 тон до 20000тон зернової сировини, при високій швидкості її завантаження (вивантаженні), з можливістю проводити активну вентиляцію продукту в середині циліндричної ємності, з повною автоматизацією великої кількості технологічних процесів. Такі силоси

мають міцну конструкцію та повністю відповідають європейським стандартам.

2.3.Способи завантаження ємностей зерном

Найпоширенішими способами заповнення кузовів транспортних засобів і циліндричних ємностей різного призначення сипучими матеріалами є три найпоширеніші способи: завантаження струменем; дощем; каскадним завантаженням і з використанням гальмівного ефекту. У кожного з цих способів є свої переваги і недоліки. Найбільш простим, але і не найкращим є завантаження компактною струменем або самопливом. При такому способі завантаження відзначається значне ущільнення в нижніх шарах насипаного зернового вантажу і сегрегація.

Якщо силос заповнювався за методом розкидання по типу дощу або душа (рис. 2.5), зерновий матеріал розподіляється по поперечному перерізі силосу з більш рівномірною щільністю. У разі розосередженого потоку (завантаження дощем), спостерігається більш рівномірне укладання частинок зернового вантажу, що призводить до збільшення місткості ємності, зниження розшарування внаслідок відсутності насипу. В результаті на початку процесу випуску тиск на днище силосу буде частково зменшуватися. В цьому випадку днище силосу не відчуває раптового додаткового тиску, і подальше зберігання зерна буде більш рівномірним. Одним з оптимальних способів заповнення ємності слід вважати такий, при якому вантаж якомога більш рівномірно розподіляється по поперечному перерізу ємності в процесі завантаження від початку до кінця.



а – заповнення розкиданням; б – заповнення в декількох точках
 Рисунок 2.5 – Рівномірне заповнення ємності і розшарування вантажу

Такий спосіб знижує сегрегацію, збільшує місткість ємності, зменшує ущільнення вантажу і це сприяє більш тривалому його зберіганню і стабілізації випуску його із ємності. Він досить універсальний, але підходить переважно для ємностей малого об'єму.

Для гравітаційної завантаження зернових вантажів і продуктів помолу без застосування допоміжних пристроїв, тобто компактним струменем, використовують стрічкові конвеєри в різному конструктивному виконанні (рис.2.6,а). Вони можуть бути забезпечені додатковими пристроями (наприклад скребками), що забезпечують скидання вантажу зі стрічки в одну або кілька точок. Для очищення від твердих та сторонніх домішок використовують пасивні відсікачі або кишені з гребінчастим уловлювачами (рис. 2.6,а)[50].

Завантаження за допомогою норії також здійснюється струменем, однак, не дивлячись на високу продуктивність, цей пристрій має обмежені функціональні можливості (рис.2.6,б).

Для завантаження кузовів транспортних засобів, використовується завантажувальний рукав (рис.2.6,в). За допомогою рукава збільшується зона завантаження, і знижуються втрати продукту при завантаженні у декілька ємностей. Він складається із шарнірно з'єднаних верхньої і нижньої труб. Всередині верхньої труби знаходиться гвинтовий транспортер [50].

Пристрій для завантаження силосних складів і різних транспортних і технологічних ємностей представлений на рис. 2.6,г [50]. Даний пристрій складається із завантажувального патрубку, в нижній частині якого закріплені дві відвідні труби, з гофрованими стінками. Така конструкція завантажувального пристрою дає можливість транспортувати вантаж у двох чи в одному напрямку.

За допомогою пристрою, який зображений на рис. 2.6,д, можна робити транспортування зернового вантажу на велику відстань, пластикові циліндричні труби, з'єднані між собою хомутами з пропущеним через них тросом, розташовуються вертикально або похило. Це дозволяє здійснювати заповнення, наприклад, з верхньої частини бункера, силосу або будівлі[50].

Гравітаційний спуск (рис. 2.6,е) містить складний гофрований жолоб. Він має заслінку, що закривається і привод. Вантаж, потрапляючи у жолоб, по мірі навантаження розтягує його. При досягненні дна ємності, від контакту відкривається заслінка і підйомом жолоба забезпечується звільнення від вантажу. Внаслідок малої висоти падіння виключається руйнування частинок зернового вантажу[50].

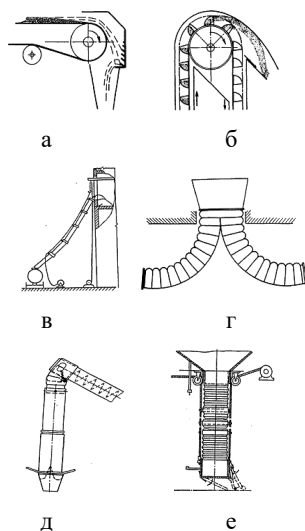


Рисунок 2.6 – Завантажувальні пристрої з концентрованим потоком.

Для зменшення травмування зерна при його завантаженні у силоси використовують спеціальні завантажувальні пристрої [50]. Робочими органами можуть бути різноманітні за конструкцією конуси, пересипні полиці встановлені у телескопічній трубі, концентричні кільця з вертикально розміщеними лопатями, вертикальні гвинтові конвеєри з вікнами, нерухомі жолоби з гальмівним ефектом тощо.

2.4.Опис конструкцій завантажувально-розподільчих пристроїв

В роботі [51] розглянуті пристрої, котрі встановлюються у середині силосів і призначені для зменшення швидкості падіння зернового матеріалу із значних висот. Так на рис. 2.7 зображені два конусні розподільники які встановлюються під завантажувальним отвором силосу. В таких пристроях зерновий вантаж із завантажувального отвору попадає на бокову поверхню конусів, при цьому відбувається зміна вертикальної швидкості матеріалу на швидкість під кутом до горизонту. В результаті, зерновий вантаж менше травмується, а утворений насип має менше динамічне ущільнення та сегрегацію.

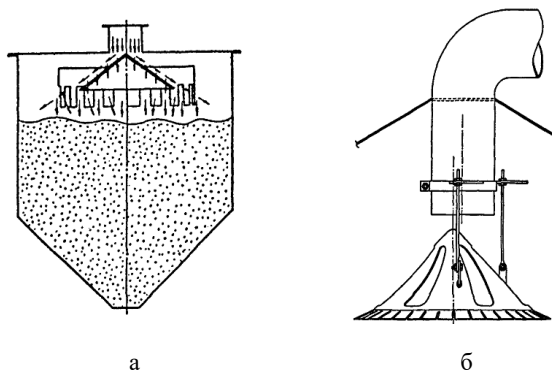


Рисунок 2.7 – Конусні розподільники.

Пристрій (рис. 2.7,а) для розподілу сипучого вантажу має конус з отворами і обичайку з пазами, концентрично розміщену із зазором навколо

основи конуса. При русі по конусу зерновий матеріал рівномірно розподіляється по його поверхні і частина його через отвори на поверхні конуса зсипається в ємність, а частина, досягнувши основи конуса, зсипається на периферію бункера [53].

Завантажувальний пристрій (рис. 2.7, б) складається з завантажувального патрубку і закріпленого на ньому за допомогою хомута зі стійкамирозсікаючого конуса. Конус має поздовжні вертикальні вирізи. Під час подачі зернового матеріалу його зернівки, при контакті з поверхнею конуса, змінюють напрямку руху і розподіляється за великим радіусом. Вирізи на конусі забезпечують падіння вантажу по центру ємності [50].

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

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

До нерухомих завантажувальних пристроїв відноситься пристрій котрий зображений на рис. 2.8,а. Цей пристрій знижує щільність падаючого до низу зернового матеріалу. Він складається із конусного бункера, в середині якого закріплений жолоб, що розширюється по мірі досягнення основи бункера. На стінках жолоба з внутрішньої сторони закріплені, для зменшення швидкості руху зернового матеріалу, решітки з чарунками. Чарунки решіток мають різні геометричні розміри: розмір верхніх більший по відношенню до нижніх, а розміри кожної решітки збільшуються по напрямку від центра до периферії. Під час руху завантажувального матеріалу крізь отвори решіток відбувається зменшення його швидкості, а як наслідок зменшення травмування зерна та відбувається рівномірне розподілення зерна по всьому периметрі ємності [54].

На рис.2.8,б наведено пристрій, що складається з розподільного бункера,

який має на бічній поверхні три ряди прямокутних вирізів. Вони розташовані в шаховому порядку і служать для розвантаження бункера. Із зовнішнього боку його дна встановлена, з можливістю обертання, вертикальна вісь, на якій під заданими в горизонтальній і вертикальних площинах кутами закріплені два ряди лопатей [50]. Потрапляючи на лопаті, вантаж викликає обертання осі, чим досягається рівномірне розкидання його частинок по всьому периметру ємності.

Для завантаження стаціонарних і пересувних ємностей використовується завантажувальний пристрій, що містить обертовий на вертикальному валу диск і кільцевий обмежувач (рис. 2.8,в). Кільцевий обмежувач виконаний з можливістю зворотно-поступального переміщення вздовж валу і повертатись навколо нього, крім того він має випускні вікна на боковій стінці. Збільшення корисного об'єму зони розкидання зернового вантажу досягається шляхом зміни швидкості обертання диску [50].

Існують також відцентрові розкидачі інших конструкцій (рис. 2.8,г), на вертикальному валу бункера горизонтально закріплені концентричні кільця з вертикально установленими лопатями [55]. Подача вантажу в ємність здійснюється одночасно з обертанням пристрою. Зерновий матеріал попавши на поверхню кільця, відкидається лопатями на відстань, яка відповідає діаметру кільця. Таким чином досягається рівномірне розподілення зернового матеріалу по всьому периметру силосу.

Для завантаження транспортних засобів може застосовуватися бункер з рухомою рамою, на якій рівномірно розташовані вертикальні лопатки (рис. 2.8,д). Лопатки завдяки шарнірному кріпленню можуть закривати і відкривати випускні патрубки бункера. Під час подачі сипкого матеріалу в бункері включають привід зворотно-поступального переміщення вилкоподібної рами. Коливальні лопатки забезпечують рівномірне розподілення вантажу у завантажувальній ємності [50].

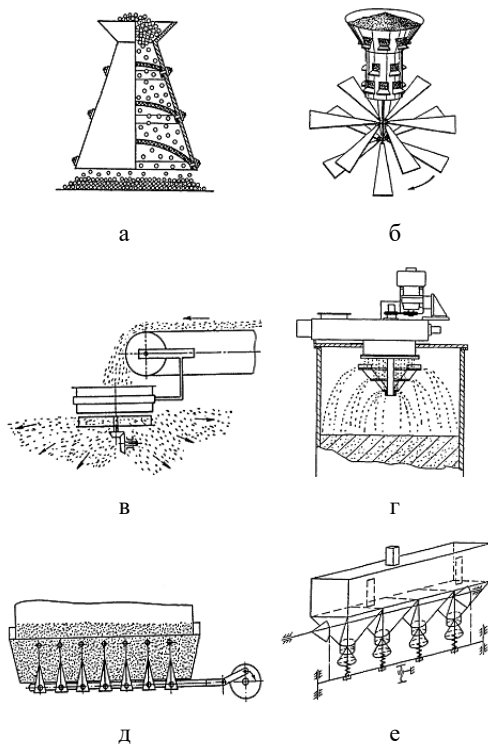


Рисунок 2.8 – Завантажувальні пристрої з розрідженим потоком [50].

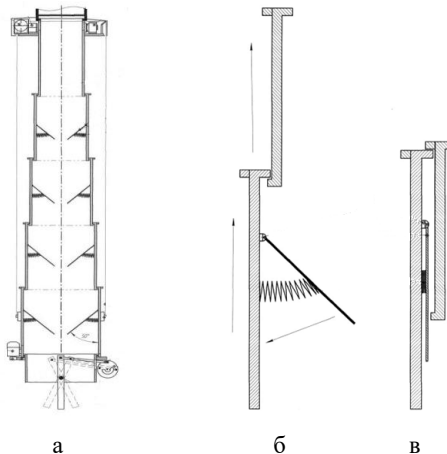
Зображений на рисунку 2.8,е пристрій, що включає бункер з випускними воронками і вивантажувальними отворами, які перекриваються конусами, призначений для завантаження зерна та продуктів його переробки [50]. При подачі матеріалу в бункер, він під дією своєї ваги опускає конусні клапани з утворенням кільцевої щілини по периметру випускних отворів, але така конструкція складна у виготовленні.

Варіантом подолання проблеми без ударного завантаження силосів зерном є створення різноманітних каскадних пристроїв які зменшують висоту вільного падіння зерна на дно ємності. Каскадний спосіб завантаження силосу більш рівномірно розподіляє зерновий матеріал по всьому периметру ємності, за рахунок чого зменшується сегрегація, ущільнення і травмування

зернівок. Рівномірне та обережне завантаження силосів зерном по принципу пересипання представлено на рис.2.9, для цього використовується телескопічна труба з боковими пересипними полицями. При завантаженні силосів із використанням телескопічних труб зерновий вантаж пересипається з однієї полиці на іншу, при цьому його швидкість постійно змінюється як за величиною так і за напрямом.

Пристрій складається із вертикальної телескопічної труби, яка в свою чергу складається із N-циліндрів. В середині циліндрів вмонтовані підпружинені пересипні лопатки. Пристрій оснащений вібратором, який призначений для уникнення склепінь зерна, та лебідкою за допомогою якої здійснюється підйом та опускання циліндрів.

Завантаження зерна в силос відбувається так, телескопічна труба за допомогою лебідки, автоматично, опускається до днища силосу, так щоб пристрій не торкнувся підлоги. Зерно в телескопічній трубі рухається пересипаючись із однієї лопатки на іншу. Лопатки сповільнюють рух зерна, і тому воно маючи невелику лінійну швидкість та відстань вільного падіння набагато менше травмується [56].



а – повздовжній переріз по вертикальній осі; б – бокові лопатки у розкладеному вигляді; в – бокові лопатки у складеному вигляді

Рисунок 2.9 – Пристрій для рівномірного завантаження зерна в силос.

Недоліком цього завантажувального пристрою є велика металосміність телескопічної труби, що негативно впливає на всю конструкцію силосу, та можливість перетирання зерна між собою під час його руху в середині телескопічної труби.

Як спосіб зниження швидкості, а, відповідно, і травмування гранульованих вантажів в силосах при завантаженні може застосовуватися трос з рядом амортизуючих елементів, встановлених поперек нього (рис. 2.10, а). Радіальний їх розмір менший ємності. Таким чином по мірі заповнення ємності трос витягується, таким чином, виключається перешкода під час випуску зернового матеріалу [50].

Для перевантаження сипучих і кускових вантажів за допомогою стрічкових транспортерів використовується гравітаційний спуск (рис. 2.10, б). Він представляє собою зигзагоподібний жолоб з дном, виконаним по кривій. Навпроти вихідних ділянок кожної із ступенів спуску розміщені кармани, що гасять швидкість руху зернового вантажу. Завдяки цьому швидкість великої фракції вантажу періодично гаситься, в той час як дрібні частинки рухаються безперервно.

Для зменшення висоти вільного падіння матеріалу при завантаженні служить каскадний пристрій (рис. 2.10, в), він складається з похило розташованих патрубків, з'єднаних між собою перехідними колінами, які змінюють напрямок руху вантажу. Тим самим виконується зниження швидкості на цих ділянках [50]. Розвантаження каскадних жолобів відбувається через вікна у їх верхній частині. Рівномірне розміщення вилучених отворів дозволяє проводити поетапне завантаження бункера з висотою падіння вантажу від 0 до 1,5 м. Даний пристрій не витягується після закінчення завантаження, що є суттєвим недоліком, оскільки служить опорою для утворення склепін і може перешкоджати випуску.

Для підвищення рівня механізації навантажувальних робіт з легко пошкоджуваними вантажами може бути використаний пристрій, що

складається з бункеру і завантажувального жолоба змінної довжини (рис. 2.10, г). З внутрішнього боку на цьому пристрої змонтовані в шаховому порядку похилі полиці, а на корпусі бункера закріплені барабани, на них намотуються стрічки, з яких складається завантажувальний жолоб. Під час розмотування стрічок з барабана вони з'єднуються в трубу, яка опускається в кузов транспортного засобу або іншу ємність, та закріплюється фіксаторами. По мірі заповнення ємностей довжина стрічок зменшується. Це дозволяє зменшити висоту падіння вантажу як всередині жолоба, так і після виходу із нього [57].

За допомогою представленого на рис.2.10,д пристрою доцільно робити завантаження коренебульбоплодів. Падаючий з транспортера вантаж під дією сили тяжіння і інерції скочується по напрямних, виконаних у формі напівциліндрів з початковою швидкістю, яка має тільки вертикальну її складову.

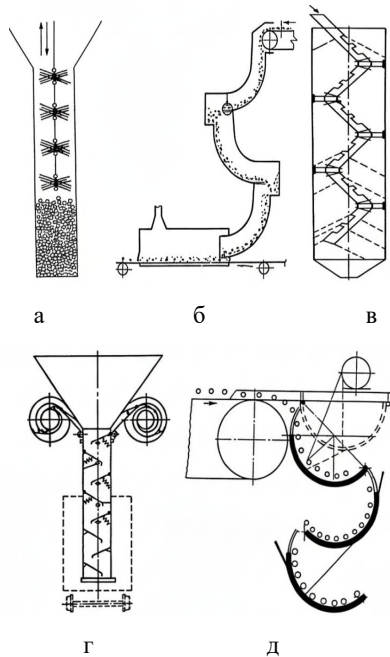


Рисунок 2.10 – Завантажувальні пристрої з каскадними спусками[50].

Завантаження силосів та інших конструкцій циліндричної форми зерном, шротовими гранулами можна здійснювати за допомогою вертикальних гравітаційно-каскадних транспортерів. В цих пристроях використовуються конусні розподільники.

Завантажувальний пристрій, що зображений на рис.2.11 складається із вертикального транспортуючого каналу, який утворений рядом зрізаних конусів і які розташовані один під одним, і під кутом відносно один до одного. Вертикальний транспортуючий канал виконаний із зазором між суміжними зрізаними конусами, при цьому кожен верхній зрізаний конус встановлений назустріч суміжному до нього нижньому і розгорнутий відносно до нього щодо вертикальної осі на 180° [58].

Пристрій працює так. Зерно із над силосного конвеєра через засипну горловину потрапляє на внутрішню поверхню першого зрізаного конуса вертикального транспортера. При зіткненні зерна з робочою поверхнею першого зрізаного конуса зерно отримує умовно-пружний удар. При цьому втрачається частина кінетичної енергії зерна на умовно-пружний удар, та відбувається зміна напрямку руху зерна і на подолання сили тертя зерна об робочу поверхню зрізаного конуса. Як наслідок дії цих чинників зменшується швидкість зерна. Зерно міняє напрям руху і продовжує рух доти, поки не потрапляє на робочу поверхню другого зрізаного конуса і так далі. На рис.2.12 показаний рух зерна у зрізаних конусах.

Параметр H (рис.2.11) визначає висоту, з якої зерно потрапляє, при вільному падінні, на дно силосу, або на його насип і не травмується. Для різних зернових культур параметр H може варіюватися від 1 до 5 м.

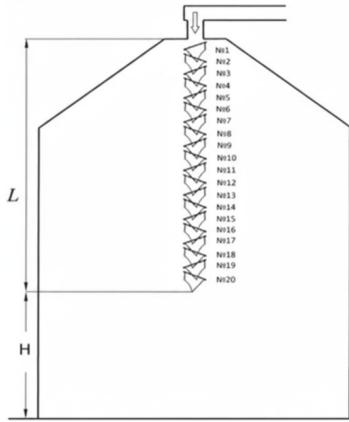


Рисунок 2.11 – Вертикальний транспортер гравітаційно-каскадного типу



Рисунок 2.12 – Рух зерна по внутрішнім поверхням зрізаних конусів

Ще один пристрій гравітаційно-каскадного типу представлений на рис.2.13. Він складається з вертикально транспортуючого каналу який утворений біля пересипних конусів. Пересипний пристрій виконаний у вигляді диска з бортом по периметру. Поверхня диска є робочою поверхнею, центральна частина виконана конусоподібною, а периферійна, між конусом і бортом, виконана у вигляді секторів-пересипних полиць, які чергуються з секторами крізних пересипних отворів. Конусоподібна поверхня забезпечує центрівку суміжних дисків і необхідний зазор між ними при збірці вертикального транспортуючого каналу [59]. Особливістю даної конструкції є каскадне розташування робочих органів, що дозволяє використовувати силу тяжіння при завантаженні зернового матеріалу.

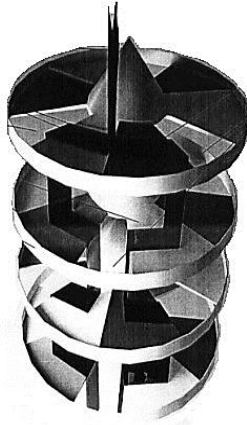


Рисунок 2.13 – Гравітаційно-каскадний транспортер з конусоподібними дисками

Даний завантажувальний пристрій працює так. Зерно з над силосного конвеєра крізь засипну горловину потрапляє на пересипні полиці першого диску, який нижче за заслінку горловини. При зіткненні зерна з пересипними полицями першого диска, воно отримує умовно-пружний удар, крім того відбувається зміна напрямку руху зерна. Як наслідок швидкість руху зерна в такому вертикальному транспортері зменшується.

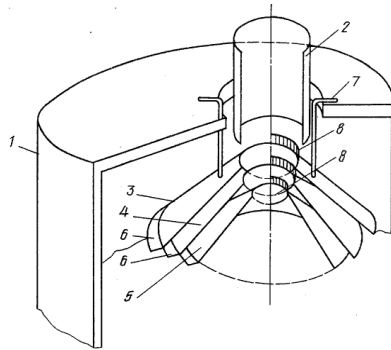
При завантаженні силосів зерном та іншими сипучими матеріалами, для тривалого зберігання, з'являється пило-повітряна суміш. Для усунення цього недоліку зарубіжними фірмами була розроблена система безперервного завантаження Vortex[60]. Дана система складається з рухомого у вертикальному напрямку рукава. В середині рукава, послідовно один під інший, та під кутом один до одного розташований суцільний ряд пересипних зрізаних конусів. Форма конусів забезпечує зменшення швидкості руху зернового потоку, приводячи його до "масового потоку". На рис.2.14 показаний рух зерна та пило-повітряної суміші в завантажувальній системі Vortex. Дана система знижує рівень викидання пилу до мінімального значення 5мг/м^3 .



Рисунок 2.14 – Завантажувальна система типу Vortex.

Система Vortex використовується для перевантаження сипких матеріалів під час навантажувально-розвантажувальних роботах. Так як вона використовується в основному для зменшення викидів пилу. За рахунок рукава пил затримується, але зерно потоком падає на дно силосу і цілісність зерна при такому способі завантаження не забезпечується.

Для рівномірного завантаження силосів сипкими матеріалами винахідниками СВ. Новоселовим і АД. Донін був запропонований гравітаційний завантажувальний пристрій який зображений на рис.2.15. Даний пристрій складається із вертикально встановленого циліндричного корпусу 1, завантажувального патрубку 2 і один під іншим співвісних конусів 3, 4, 5 із горизонтальними козирками 6 і обичайками 8 [61]. Пристрій встановлюється в середині силосу по осі засипної горловини.



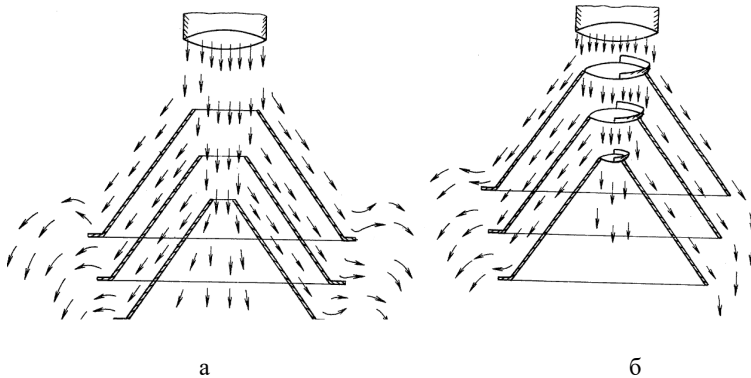
1 – корпус; 2 – завантажувальний патрубок; 3, 4, 5 – співвісні конуси;

6 – горизонтальні козирки; 7 – кріплення; 8 – обичайки

Рисунок 2.15 – Пристрій для рівномірного завантаження сипких матеріалів

При подачі зернового потоку над силосним конвесером зерно потрапляє в засипний патрубок силосу. Поперечний переріз зернового потоку більший за діаметр верхнього отвору конуса. Більша маса зерна проходить через отвір верхнього конуса, інша частина ковзає по його боковій поверхні до козирка. Зерно, дякуючи козирку міняє напрям руху, і засипається ближче до внутрішньої стіни силосу (рис.2.16). Зерновий потік, що пройшов через отвір верхнього конуса потрапляє в отвір середнього конуса, а його частина направляється в простір між внутрішньою поверхнею верхнього конуса і зовнішньою поверхнею середнього конуса і скидається в низ силосу. Зерно, що залишилося проходячи через отвір останнього (нижнього) конуса і зсипається в центральній частині силосу.

Для завантаження ємностей сипким вантажем інколи використовують гофрований жолоб. Жолоб може по мірі наповнення розтягуватися, а при досягненні дна ємності відкривається його нижня заслінка і підйом жолоба забезпечує звільнення вантажу. Внаслідок малої висоти падіння зерна на дно силосу виключається ушкодження зернівок зернового вантажу.

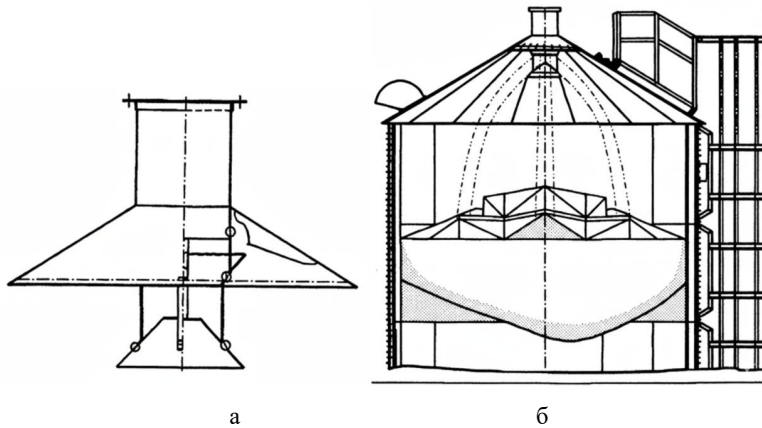


- а – симетричне розміщення завантажувального патрубка;
 б – асиметричне розміщення завантажувального патрубка

Рисунок 2.16 – Рух зернового потоку в завантажувальному пристрої конусного типу.

На рис.2.17,а представлений пристрій для завантаження силосу, або подібної циліндричної оболонкової ємності, сипким матеріалом, він призначений для рівномірного та однорідного завантаження силосних зерносховищ зерновим матеріалом. Пристрій складається із завантажувального патрубку, який встановлюється на даху силосу, під вихідним отвором патрубку, за допомогою кронштейна співвісно підвішена конічна обичайка з направленим до низу вихідним з меншим торцевим отвором.

Конічна обичайка встановлена із проміжком між нижнім вертикального циліндричного завантажувального патрубку та їх верхнім краєм. Під конічною обичайкою за допомогою кронштейнів співвісно встановлено конічну обичайку з направленим догори меншим торцевим отвором. Площа направленого догори меншого торцевого отвору обичайки вдвічі менша за площу направленого додолу вихідного меншого торцевого отвору обичайки, меншої за площу отвору завантажувального патрубку [62].



а – завантажувальний пристрій; б – схема завантаження силосу сипким матеріалом

Рисунок 2.17– Пристрій для завантаження силосу або подібної циліндричної оболонкової ємкості сипким матеріалом.

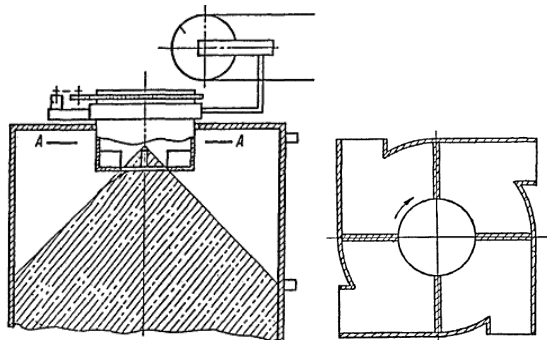
На рис.2.17,б показана схема завантаження силосу зерном. Потік зерна, що його подають згори у завантажувальний патрубок, крізь вихідний отвір завантажувального патрубка і вихідний отвір обичайки потрапляє на обичайку і розділяється на два потоки. Зерновий потік, який проходить крізь менший торцевий отвір обичайки скидається до центру силосу, а потік який проходить по зовнішній конічній поверхні обичайки рівномірно спрямовується до периферії силосу.

Утворення центрального пагорба в середній частині та кільцевого пагорба ближче до периферії та перемішування фракцій в пристрої для завантажування сприяють більш рівномірному розподіленню зерна в середині внутрішнього об'єму силосу, що забезпечує зменшення згинальних зусиль, які діють на оболонкову конструкцію.

Недоліком цього пристрою є те, що неефективно використовується енергія гравітаційного силового потоку в процесі розподілення зернової маси

по робочій площі силосу, а також травмуванні зерна яка падає з високої відстані додолу силосу.

На рис. 2.18 показано пристрій[50], в якому спочатку відбувається гравітаційне завантаження до вершини зернового насипу. Після утворення зернового насипу у силосі автоматично включається привід конуса. Внаслідок чого зерновий матеріал продовжує надходити в бункер за рахунок обертального руху пластини і під дією відцентрових сил відкидається до периферії, заповнюючи порожнечі силосу.



вигляд зверху по січній А-А

Рисунок 2.18 – Комбінований завантажувальний пристрій

Завантажувальні пристрої з використанням приводу також отримали широке розповсюдження (відцентрові, дискові, роторні розкидачі та інші).

Для завантаження стаціонарних і пересувних ємностей використовується пристрій[63], що містить на вертикальному валу диски з кільцевими перфорованими обмежувачами (рис.2.19,а). При обертанні сипуча маса розганяється відцентровою силою в горизонтальному положенні і виплескується через отвори в огорожі. Варіюванням розмірами дисків можна забезпечити різну ступінь розкидання сипучого матеріалу в порожнину ємності. Збільшення корисного об'єму зони падіння досягається зміною швидкості обертання диска.

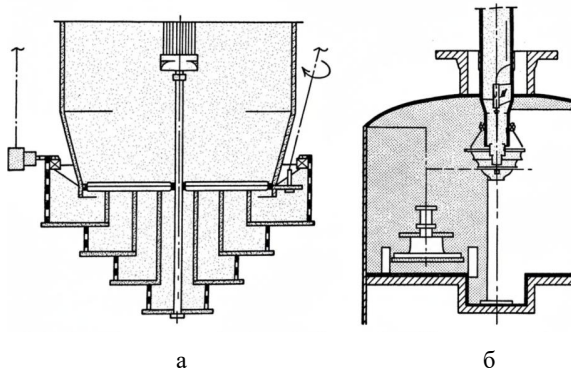


Рисунок 2.19 – Схема завантажувально-розподільчих пристроїв з наявністю приводу

На рис.2.19,б зображена схема відцентрового розкидача. На вертикальному валу цього пристрою в горизонтальній площині закріплені диски з вертикально розміщеними лопатями. Подача сипкого матеріалу у ємність здійснюється з одночасним обертанням пристрою. Сипкий матеріал потрапивши на поверхню дисків відкидається лопатями на відстань, яка відповідає діаметру кільця. Таким чином досягається рівномірний розподіл сипкого матеріалу по всьому периметру ємності

Класичними дослідженнями виявлено, що висота падіння та тип поверхні суттєво впливають на цілісність зерна. Найбільше травмування відбувається при вільному падінні зерна з висоти понад 15...12 метрів [64] на тверду поверхню або на шар зерна, що вже лежить.

Зарубіжні автори порівнюють стандартне гравітаційне завантаження силосів зерновим матеріалом з використанням ступінчастих гасителів швидкості. Результати досліджень з використанням таких пристроїв показали зменшення битих зернівок на 30...50% [136]. Для зниження швидкості падіння зернового матеріалу в силоси вони пропонують використовувати пристрої з набором каскадних полиць (драбини), спіральні жолоби (спіралі) та затискні клапани які регулюють щільність зернового потоку.

Ступінчаті гасителі швидкості працювати тільки з добре сипучим матеріалом, так як зв'язані між собою частинки можуть забивати отвори і не пропускати потік матеріалу, що надходить на робочі органи пристроїв.

До нерухомого завантажувального пристрою, котрий знаходиться в середині силосу і використовує каскадний спосіб завантаження, відноситься пристрій який виконаний у вигляді безлічі нахилених лотків (рис.2.20). Нахилені лотки виконують роль гасителя швидкості падіння зерна у силос. Пристрій складається із ємності 1, завантажувального патрубку 2, гасителя швидкості падіння зерна 3, нахилених лотків 4 і рами 5 [65].

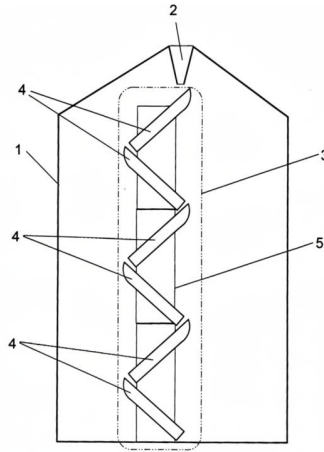
В середині силосу лотки сполучені між собою таким чином, що вихід з попереднього лотка сполучений із входом наступного лотка. Нахилені лотки виконані з можливістю установки кута їх нахилу щодо горизонтальної площини в межах від 25 градусів до 40 градусів.

Пристрій працює в такий спосіб. Зерно з завантажувального патрубка 2 самопливом надходить на вхід верхнього першого походу руху зерна нахиленого лотка 4, швидкість падіння зерна гаситься на виході лотка 4, що має меншу ширину, чим на його вході.

При переході потоку зерна від попереднього лотка 4 до входу наступного лотка 4 потік зерна змінює напрямок руху на протилежний, це додатково гасить швидкість падіння зерна.

Можливість регулювання кута ухилу лотків 4 у бік руху потоку зерна в межах кута їх нахилу від 25 градусів до 40 градусів дозволяє відрегулювати кут нахилу лотків відповідно до кутатертя для зернової маси, що завантажується в зерносховище.

При завантаженні в ємність 1 зерно надходить поступово, в міру заповнення ємності 1, засипає нахилені лотки 4, які залишаються засипаними зерном усередині об'єму завантаженого в ємність 1 зерном.



1 – циліндрична ємність; 2 – завантажувальний патрубок; 3 – гасителі падіння зерна; 5 – нахиленні лотки; 6 – металева рама

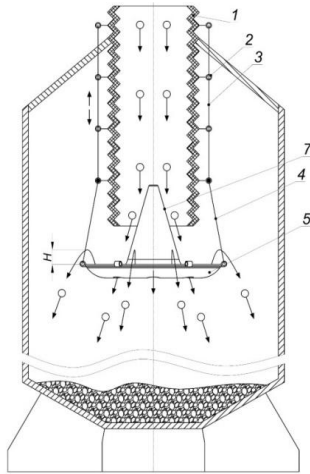
Рисунок 2.20–Зерносховище Фадєєва

При такому завантаженні спуск зернового матеріалу приводить до нейтралізації процесу сегрегації, збереженню цілісності насінні і зниженню щільності в нижніх шарах насипу.

2.5.Завантажувальні пристрої металевих силосів з гальмівним ефектом

Для покращення процесу завантаження силосів зерновим матеріалом, без його травмування, використовуються пристрої, які незважаючи на певні витрати, загалом удосконалюють функціональні параметри ємності.

Завантажувальні пристрої – технічні засоби призначені для обережного заповнення ємності сипучим вантажем. На рис.2.21 зображений пристрій для обережного завантаження зернового вантажу в силос[66].



1– гофрований рукав; 2 – напрямні кільця; 3 – трос; 4 – кріплення;
 5 – тороподібна тарілка; 6 – вигнуті краї; 7 – зрізаний конус
 Рисунок 2.21–Пристрій для обережного завантаження зерна в силос

Пристрій для обережного завантаження зерна в силос складається з гофрованого завантажувального рукава 1, що має на своїй зовнішній бічній стороні напрямні у вигляді кільця 2 з протягнутими крізь них тросами 3, механічного приводу (не вказано) підйому-опускання рукава та закріпленої гнучкими ланками 4 до напрямних рукава 1 тороподібна тарілка 5 з вигнутими назовні краями 6, центральною конусоподібною напрямною 7, зорієнтованою меншою своєю основою до внутрішнього простору рукава 1, та круговим масивом наскрізних отворів 8 на днищі 9 тарілки 5.

Пристрій для обережного завантаження зерна в силос працює наступним чином. При потребі заповнення спустошеного силосу зерном механізмом підйому-опускання розтягують гофрований рукав 1 по всій довжині, опускаючи його та тороподібну тарілку 5 донизу силосу. Розправивши на повну довжину рукав 1, до його верхньої частини подають зернову масу, яка під впливом гравітаційного поля прямує в напрямку днища силосу. Досягаючи малої основи центральної конусоподібною напрямною 7 тороподібною тарілки 5, зерно

розподіляється і рухається у кільцевому зазорі між напрямною 7 та внутрішньою стороною рукава 1, при цьому величина кільцевого зазору постійно зменшується по мірі наближення зерна до більшої основи конусної напрямної 7, що дозволяє отримати кільцевий зерновий потік невеликого поперечного перерізу.

Досягнувши тороподібної тарілки 5, зерно торкається його ввігнутої поверхні днища 9 і за рахунок своєї інерції, ковзаючи по ній, вилітає з тарілки 5 вгору на певну висоту H , гасячи таким чином зайву кінетичну енергію, надлишок якої при зіткненні з днищем силосу призвів би до травмування зерна та втраті його суцільності. Вигнуті кромки 6 тарілки 5 поліпшують виліт зерна, не чинячи йому зайвого опору. Частина зерна, яка не мала достатньої швидкості руху для вильоту з тарілки 5 по дотичній до його внутрішньої поверхні, просипається донизу крізь масив отворів 8 на днищі 9 тарілки 5. При цьому швидкість виходу зерна з отворів 8 значно зменшена за рахунок багатократної контактної взаємодії зерна між собою в потоці та поверхнею днища 9 тарілки 5. Це також сприяє зменшенню ударної сили взаємодії зерна об днище силосу.

Вихід зернового потоку з тарілки 5 різними шляхами дозволяє збільшити площу поперечного перерізу зернового потоку, що рухається донизу силосу, рівномірно заповнюючи його нижню частину.

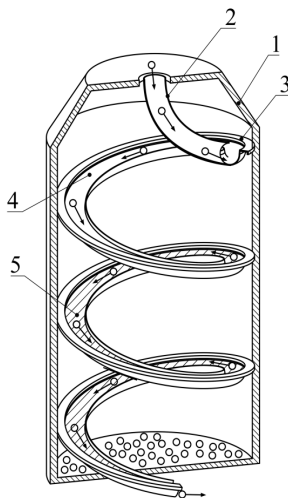
З поступовим заповненням силосу висота зернового шару збільшується і наближається до тороподібної тарілки 5, яку разом з гофрованим рукавом 1 за допомогою механізму підйому-опускання підіймають догори, забезпечуючи протікання обережного процесу завантаження вже на більш вищій висоті від днища.

Таким чином, використання у пристрої для обережного завантаження зерна в силос тороподібної тарілки з центральною конусоподібної напрямною та круговим масивом наскрізних отворів в її днищі сприяє зменшенню кінематичної енергії руху зерна, тим самим мінімізуючи можливе його деформаційне руйнування та зменшуючи рівень травмування, та забезпечує

збільшення площі поперечного перерізу зернового потоку, рівномірно його розподіляючи по поверхні заповнення.

Застосування гальмівних пристроїв виконаних у вигляді гвинтової спіралі для завантаження циліндричних силосів значної висоти дозволяє доставляти зерновий вантаж на дно ємності без травмування, та сегрегації. На рис.2.21 наведена схема циліндричного силосу із спіральним завантажувачем [67].

Силос містить ємність 1 циліндричної форми для збереження зерна, у верхній частині якої закріплений трубоподібний завантажувальний патрубок 2. До циліндричної ємності 1 з внутрішньої її сторони закріплений периферійний відкритий гвинтовий канал 3 за допомогою кронштейнів 4. Завантажувальний патрубок 2 спрямовує зерновий потік від верхньої частини ємності 1 до внутрішнього простору каналу 3.



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

Рисунок 2.21– Силос зі спіральним завантажувачем

Тіло гвинтового каналу 3 утворено провертанням U-подібного профілю за гвинтовою лінією із змінним кроком, що зменшується послідовно від найбільшого значення h_3 , на ділянці L3 гвинтової лінії у верхній частині ємності 1, до найменшого h_1 , на ділянці L1 в нижній частині ємності 1. Це дає змогу отримати плавне поєднання ділянки каналу 3 з поступовим зменшенням кута спуску по висоті ємності 1 від найбільшого ϕ_3 до найменшого ϕ_1 . Величина кута ϕ_1 вибирається дещо більшим від кута тертя зернової культури, що зберігається в силосі, і приймається в межах 30-40 градусів. Значення кутів ϕ_2 та ϕ_3 приймаються більшими від ϕ_1 на 10 та 20 % відповідно.

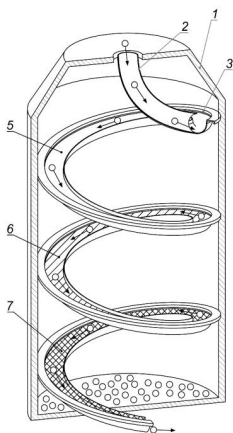
Силос функціонує таким чином. Зерно із завантажувального патрубку 2 самопливом надходить на вхід гвинтового каналу 3, у верхній частині якого зерновий потік отримує суттєвий приріст своєї швидкості руху за рахунок значного кута спуску ϕ_3 . Збільшення швидкості на першій ділянці гвинтового каналу обумовлено потребою убезпечити утворенню зернових застоїв та убезпечити пересипання зерна через краї каналу 3 з послідувачим неконтрольованим падінням у нижню частину ємності 1 з високою ймовірністю отримання механічних деформацій. Минаючи круту ділянку гвинтового каналу 3 довжиною L3, швидкість зерна починає поступово зменшуватися за рахунок меншого кута спуску ϕ_2 на наступній ділянці L2. По досягненню кінцевої ділянки спуску L1 зерновий потік плавно висипається у нижню частину ємності, заповнюючи його об'єм. При цьому швидкість сходу зерна з каналу 3 в повній мірі зменшена, за рахунок меншого кута ϕ_1 на цій ділянці, до величини, що запобігає виникненню критичних значень сил співудару зерна об стінки або днище ємності 1, зменшуючи вірогідність його механічного травмування. По мірі заповнення ємності 1, засипається і гвинтовий канал 3.

Таким чином, використання в силосі гвинтоподібного каналу сприяє створенню необхідного градієнту швидкості руху зернового потоку по всій довжині каналу, що забезпечує безперешкодний та швидкий рух зерна у верхній частині каналу та за рахунок уповільнення швидкості переміщення

зерна на виході з каналу мінімізується можливе деформаційне руйнування зерна та зменшення рівня його травмування.

На рис.2.22 зображений силос, який оснащується спіральним завантажувачем робоча поверхня якого покрита матеріалом з різним ступенем зчеплення[68].

Силос містить ємність 1 циліндричної форми для збереження зерна, у верхній частині якої закріплений трубоподібний завантажувальний патрубок 2. До циліндричної ємності 1 з внутрішньої її сторони закріплений периферійний відкритий гвинтовий канал 3 за допомогою кронштейнів 4. Завантажувальний патрубок 2 спрямовує зерновий потік від верхньої частини ємності 1 до внутрішнього простору каналу 3.



1 – циліндрична ємність; 2 – завантажувальний патрубок; 3 – відкритий гвинтовий канал; 4 – розгінна ділянка вкрита різними трибологічними властивостями; 5– гальмівна ділянка вкрита різними трибологічними властивостями.

Рисунок 2.22– Силос зі спіральним завантажувачем з неоднорідним покриттям поверхні спуску

Тіло гвинтового каналу 3 утворено провертанням U-подібного профілю за гвинтовою лінією. При цьому утворена поверхня спуску гвинтового каналу

розбита на три рівні ділянки 5, 6, 7. На кожен ділянку нанесено покриття з різними трибологічними властивостями, при цьому для кожної нижче розташованої частини поверхні спуску гвинтового каналу величина контактної взаємодії з зерном зростає.

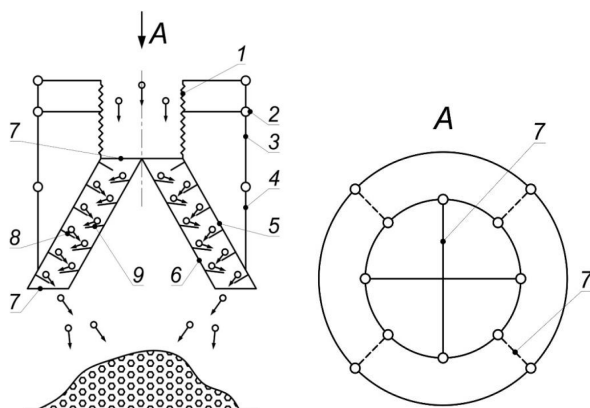
Силос функціонує таким чином. Зерно із завантажувального патрубку 2 самопливом надходить до гвинтового каналу 3, у верхній частині якого зерновий потік, перебуваючи на першій частині 5 поверхні спуску з мінімальними контактними властивостями, отримує суттєвий приріст швидкості свого переміщення у каналі. Збільшення швидкості на першій ділянці гвинтового каналу обумовлено потребою забезпечити утворенню зернових застоїв та забезпечити пересипання зерна через край каналу 3 з послідуочим неконтрольованим падінням у нижню частину ємності 1 з високою ймовірністю отримання механічних деформацій.

Минаючи першу частину 5 поверхні спуску, зерно потрапляє на другу частину 6 поверхні, де за рахунок наявності відмінного за трибологічними властивостями покриття контактна взаємодія підвищується, що відображається на збільшенні гальмуючого ефекту за рахунок зростання сили тертя та уповільнення темпів підвищення швидкості руху зернової маси у гвинтовому каналі 3. На останній частині 7 поверхні спуску рух зерна відбувається при згасаючому характеру зміни швидкості руху із-за наявності найбільш високо контактного покриття з двох попередніх, що запобігає виникненню критичних значень сил співудару зерна об стінки або днище ємності 1, зменшуючи вірогідність його механічного травмування. По мірі заповнення ємності 1, засипається і гвинтовий канал 3.

Таким чином, використання в силосі гвинтоподібного каналу з окремо виділеними частинами з різномірним за трибологічними властивостями покриттям сприяє створенню необхідного градієнту швидкості руху зернового потоку по всій довжині каналу, що забезпечує безперешкодний та швидкий рух зерна у верхній частині каналу та за рахунок уповільнення швидкості переміщення зерна на виході з каналу мінімізується можливе деформаційне

руйнування зерна та зменшення рівня його травмування, при цьому при створенні гвинтового каналу всередині силосу достатньо буде зберегти постійний крок його спуску, що не вимагає значних трудових витрат на монтаж.

Завантажувальний пристрій конусного типу (рис.2.23) може бути використаним для зменшення травмування зерна та його сегрегації в процесі заповнення ємності та збільшення рівномірності заповнення[69].



1 – гофрований рукав; 2 – напрямні кільця; 3 – трос; 4 – напрямні ланки;
5 – зовнішній конус; 6 – внутрішній конус; 7 – перемички

Рисунок 2.23– Завантажувальний пристрій конусного типу

Завантажувальний пристрій конусного типу складається з гофрованого завантажувального рукава 1, що має на своїй зовнішній бічній стороні напрямні у вигляді кільця 2, з протягнутими крізь них тросами 3, механізму приводу (не вказано) підйому – опускання рукава та закріпленого гнучкими ланками 4 до напрямних рукава 1 зовнішнього зрізаного у верхній частині конуса 5, в середині якого симетрично знаходиться повноцінний конус 6, закріплений у верхній і нижній частинах перемичками 7 із зовнішнім зрізаним конусом 5. Внутрішня бокова сторона зовнішнього зрізаного конуса 5 оснащена рядом дисків конусного типу 8, які розміщені перпендикулярно до бокової поверхні цього конуса, та під кутом α до горизонту. Зовнішні бічна сторона

повноцінного конуса 6 оснащена дисками конусного типу 9 які розміщені під кутом β до горизонту. Диски конусного типу розміщені в просторі між внутрішньою боковою поверхнею зрізаного конуса 5 і зовнішньою боковою поверхнею повноцінного конуса 6, із зміщеним кроком розташування, причому диски які розміщені на зовнішній боковій поверхні конуса 6 завжди знаходяться між двома суміжними дисками конічного типу зрізаного конуса.

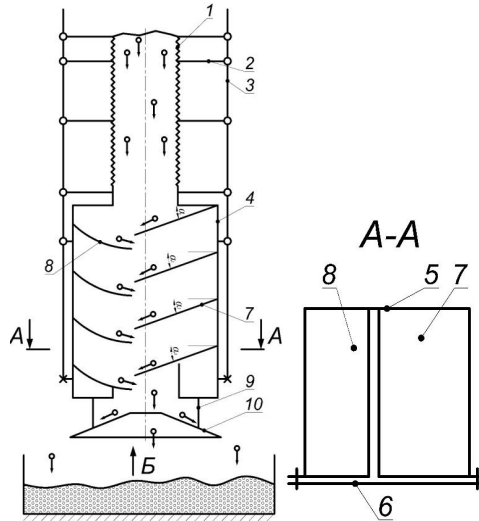
Завантажувальний пристрій конусного типу працює наступним чином.

При потребі завантаження спустошеного силосу зерном механізмом підйому – опускання розтягують гофрований рукав 1 по всій його довжині разом із пристроєм конусного типу до низу силосу. Розправивши на повну довжину рукав 1, до його верхньої частини подають зерновий матеріал, який під впливом сили тяжіння Землі прямує в напрямку бетонного днища силосу. Досягнувши вершини внутрішнього конуса 6, зерно отримує умовно-пружний удар, внаслідок чого воно змінює напрям вертикального руху на похилий. Внаслідок зміни напрямку руху зерно потрапляє на перший конусний диск 8, який розміщений на внутрішній боковій поверхні зрізаного конуса 5. Потрапивши в зону конусних дисків 8 і 9 зерно увесь час змінює напрям свого руху, при цьому рух зернового матеріалу по поверхнях конусних дисків сповільнюється, при цьому ударна сила зерна об бетонну основу силосу значно зменшується.

Таким чином, використання у завантажувальному пристрої конусних дисків сприяє зменшенню кінематичної енергії руху зерна, тим самим мінімізуючи можливе його деформаційне руйнування та зменшуючи рівень травмування. При цьому використання елементів конструкції простої геометричної форми дозволяє спростити його виготовлення та монтаж

У виробничій практиці під час заповнення силосів зерновим матеріалом можна використати завантажувальний пристрій пересипного типу [70].

На рис. 2.24 наведена принципіальна схема цього пристрою.



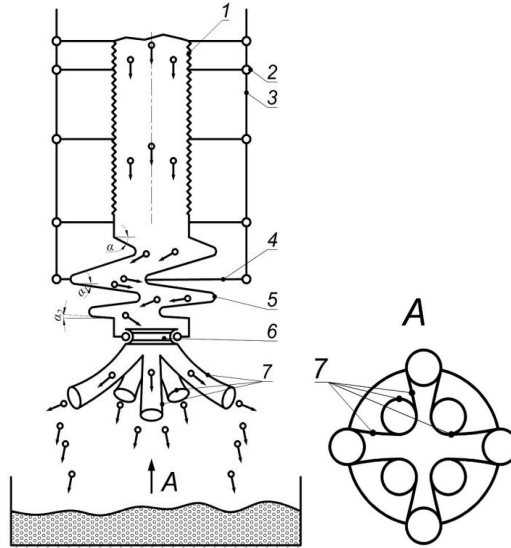
1 – гофрований рукав; 2 – напрямні кільця; 3 – трос; 4 – прямокутний жолоб;
 5 – П-подібна частина жолоба; 6 – пластина; 7 – пересипні полиці
 зпрямолінійною скатною поверхнею; 8 – пересипні полиці з криволінійною
 скатною поверхнею; 9 – вертикальні штирі; 10 – зрізаний конус.
 Рисунок 2.24– Завантажувальний пристрій пересипного типу.

Завантажувальний пристрій пересипного типу складається із гофрованого рукава 1, що має на своїй зовнішній бічній стороні напрямні у вигляді кільць 2, з протягнутими крізь них тросами 3, механізму приводу (не вказано) підйому-опускання рукава 1, трос 3 в нижній частині прямокутного короба 4 жорстко закріплений. Прямокутний короб 4 пристрою складається із П-подібної частини 5, до якої кріпиться прямокутна пластина 6. В середині короба 4 по правій стороні встановлені пересипні полиці 7 з прямилолінійною скатною поверхнею під певним кутом до горизонту, причому кут $\alpha > \alpha_1 > \dots > \alpha_n$. В лівій внутрішній частині прямокутного короба 4 встановлені пересипні полиці 8 з криволінійною скатною поверхнею. В нижній частині за допомогою штирів 9 закріплений зрізаний конусний розкидач 10.

Завантажувальний пристрій пересипного типу працює наступним чином. При потребі завантаження порожнього силосу зерном, механізмом підйому-опускання розтягують гофрований рукав 1 по всій його довжині разом із пристроєм пересипного типу 4 до низу силосу. Розправивши на повну довжину рукав 1, до його верхньої частини подають зерновий матеріал, який під впливом сили тяжіння Землі рухається в напрямку бетонної основи силосу. Досягнувши першої пересипної полиці 7, зерновий матеріал змінює свій вектор вертикальної швидкості на вектор швидкості, який направлений на другу криволінійну полицю 8. Подальший рух зернового матеріалу відбувається аналогічно. Шлях проходження зернового матеріалу збільшується і залежить від кількості встановлених у коробі пересипних полиць. Рухаючись у пересипному пристрої швидкість зернового матеріалу весь час змінюється як за величиною, так і за напрямком. Тому, на виході швидкість зернового матеріалу буде незначною і травмування зерна не відбувається. Після виходу зернового матеріалу із пересипного пристрою він потрапляє на бокову поверхню, зрізаного у верхній частині, конуса 10. Потрапивши на бокову поверхню конуса 10, частина зернового матеріалу скочується по всьому периметру силосу, а деяка його частина через центральний отвір конуса 10 осипається в середину силосу.

Таким чином, використання у завантажувальному пристрої пересипних полиць та зрізаного конусного розподільника сприяє зменшенню кінетичної енергії руху зерна, тим самим мінімізує можливість його деформаційного руйнування та травмування, крім того рівномірне заповнення силосу по всій його площі зменшує сегрегацію зернового насипу. При такому використанні елементів конструкції простої геометричної форми можна спростити виготовлення та монтаж даного пристрою.

На рис.2.25 зображений пристрій для рівномірного завантаження силосу зерном, в якому найінтенсивніше переміщення зернового вантажу в низ відбувається у спеціальній головці [71].



1 – гофрований рукав; 2 – напрямні кільця; 3 – трос; 4 – кріплення;
 5 – гвинтовий канал; 6 – циліндрична головка; 7 – тубус
 Рисунок 2.25–Пристрій для рівномірного завантаження силосу зерном

Пристрій для рівномірного завантаження силосу зерном складається із гофрованого рукава 1, що має на своїй зовнішній бічній стороні напрямні у вигляді кільця 2, з протягнутими крізь них тросами 3, механізму приводу (не вказано) підйому-опускання рукава та закріпленого гнучкими ланками 4 до напрямних рукава 1, сегментного гвинтового каналу 5. Кути нахилу формують гвинтової лінії кожного сегменту каналу 5 по мірі віддалення від вихідного перерізу рукава 1 зменшуються: $\alpha > \alpha_1 > \alpha_2$. Кути α , α_1 , α_2 є більшими від кута зовнішнього тертя зерна. В нижній частині каналу 5 закріплена головка 6 з спрямовуючими тубусами 7 різної довжини та спрямування.

Пристрій для рівномірного завантаження силосу зерном працює наступним чином. При потребі завантаження пустого силосу зерном, механізмом підйому-опускання розтягують гофрований рукав 1 по всій його

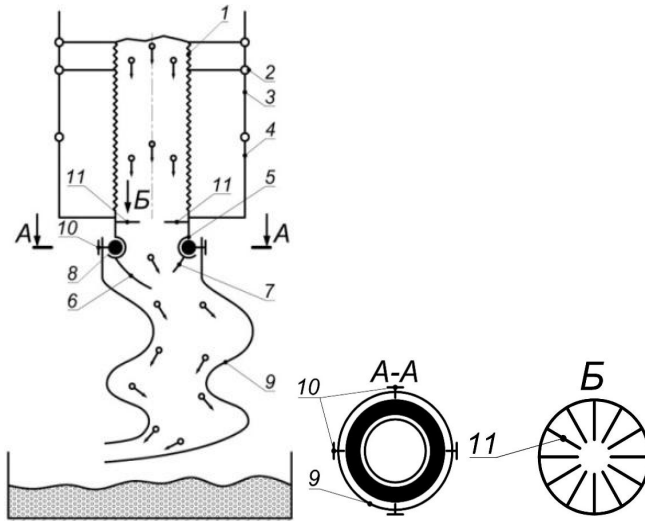
довжині разом із гвинтовим каналом 5 і головкою 6. Розправивши на повну довжину рукав 1, до його верхньої частини подають зерновий матеріал, який під впливом сили тяжіння Землі рухається в напрямку бетонної основи силосу. Досягнувши гвинтового каналу 5, швидкість зернового матеріалу весь час змінюється як за величиною, так і за напрямком. Потрапивши у гвинтовий канал, зерно сповільнює свій рух за рахунок зміни вектору швидкості та зменшення кутів нахилу кожного із сегментів гвинтового каналу 5. З гвинтового каналу 5 зерно потрапляє до головки 6 та розподіляється по тубусам 7. Внаслідок того, що тубуси 7 мають різну довжину, зерно рівномірно вивантажується з головки 6 та рівномірно просипається по всій площині насипу в силосі. Внаслідок такого завантаження значно зменшується сегрегація зернового насипу, зерно менше травмується, зменшується щільність укладки зерна.

Таким чином, використання гвинтового каналу та головки з тубусами приводить до рівномірного завантаження силосу по всій його площі, що значно зменшує сегрегацію зернового насипу. Таке завантаження приводить до зменшення тиску зернового насипу на стінки і дно силосу. При такому використанні елементів конструкції простої геометричної форми можна спростити виготовлення та монтаж даного пристрою.

Для рівномірного і без ушкодженого надходження зернового матеріалу у смінь (рис.2.2б) пропонується завантажувальний пристрій гвинтового типу [72].

Завантажувальний пристрій гвинтового типу складається із гофрованого рукава 1, що має на своїй зовнішній бічній стороні напрямні у вигляді кілець 2, з протягнутими крізь них тросами 3, механізму приводу (не вказано) підйому-опускання рукава та закріпленого гнучкими ланками 4 до напрямних рукава 1 напівсферичні ланки 5, в нижній частині яких знаходиться напрямна 6 і захисна 7 пластини, в просторі ланок 5 розміщене циліндричне кільце 8 до якого кріпиться гвинтовий канал 9 за допомогою гвинтів 10. У верхній частині напівсферичних ланок перпендикулярно до повздовжньої осі рукава 1

рівномірно закріплені по всьому внутрішньому діаметру радіально спрямовані еластичні стрижні 11.



1 – гофрований рукав; 2 – напрямні кільця; 3 – трос; 4 – пристрої для кріплення тросів; 5 – шарнір; 6, 7 – напрямні пластини; 8 – гвинтовий канал;
10 – гвинти; 11 – стержні еластичні.

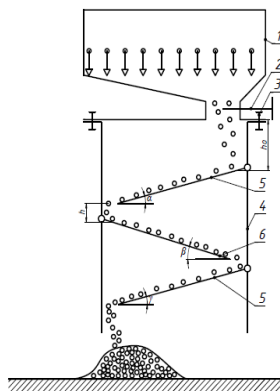
Рисунок 2.26–Завантажувальний пристрій гвинтового типу

Завантажувальний пристрій гвинтового типу працює наступним чином. При потребі завантаження порожнього силосу зерном, механізмом підйому-опускання розтягують гофрований рукав 1 по всій його довжині разом із гвинтовим каналом 9 донизу силосу. Розправивши на повну довжину рукав 1, до його верхньої частини подають зерновий матеріал, який під впливом сили тяжіння Землі рухається в напрямку бетонної основи силосу. Досягнувши еластичних стрижнів 11, рух зерна дещо загальмовується при входженні до гвинтового каналу 9. При цьому за рахунок використання напрямної 6 та захисної 7 пластини зерно концентровано спрямовується до внутрішнього простору гвинтового каналу 9. У гвинтовому каналі 9 швидкість зернового

матеріалу весь час змінюється як за величиною, так і за напрямком. Гвинтовий рух зернового матеріалу призводить до появи відцентрової сили, яка провертає гвинтовий канал 9 навколо своєї вертикальної осі. Потрапивши у гвинтовий канал, зерно сповільнює свій рух за рахунок зміни вектору швидкості і кроку гвинта каналу, внаслідок чого ударна сила зерна об основу силосу значно зменшується. Провертання гвинтового каналу 9 навколо своєї вертикальної осі сприяє більш рівномірному формуванню зернового насипу та зменшенню рівня сегрегації зернової маси.

Таким чином, використання у завантажувальному пристрої гвинтового каналу із зменшувальним кроком загвинчування та еластичних стрижнів сприяє зменшенню кінетичної енергії руху зерна, тим самим мінімізує можливість його деформаційному руйнуванні та травмуванні. Крім того, рівномірне заповнення силосу по всій його площі зменшує сегрегацію зернового насипу. При цьому використання елементів конструкції простої геометричної форми дозволяє спростити конструктивне виконання даного завантажувального пристрою.

Для завантаження зернового вантажу в силоси, з використанням гальмівного ефекту, пропонується завантажувальна гравітаційно-каскадна установка [73], яка зображена на рис.2.27.



- 1 – бункер; 2 – шибєрна заслінка; 3 – болти; 4 – прямокутний металевий корпус;
5 – розгінні полиці; 6 – гальмівні полиці.

Рисунок 2.27–Завантажувальна гравітаційно-каскадна установка

Основними елементами завантажувальної гравітаційно-каскадної установки є завантажувальний бункер 1 та металевий корпус 4 у вигляді паралелепіпеду, що скріплені між собою болтовим кріпленням 3. Для регулювання потоку зерна, що виходить з бункера та поступає до металевому корпусу, використовується шиберна заслінка 2. Всередині металевому корпусу 4 розташовані по всій його висоті каскад розгінних 5 та гальмівних 6 полиць, що чергуються між собою. При цьому група розгінних 5 полиць розташовані по одну сторону корпусу 4, а гальмівні 6 – з протилежного його боку. Верхній край першої розгінної полиці 5 розташований безпосередньо під заслінкою 2 на відстані h_0 . Кожна розгінна полиця 5 має однаковий кут нахилу α до горизонту і розташовується вище від гальмівної полиці 6. Відстань між нижнім краєм кожної з полиць до верхнього краю нижньої полиці є однаковою та фіксованою відстанню h . Гальмівні полиці 6 розташовуються під різними кутами до горизонту: перша – під кутом β , друга – під кутом γ . Кути нахилу β , у гальмівних полиць 6 є меншими від спільного кута нахилу α розгінних ділянок 5.

Завантажувальна гравітаційно-каскадна установка функціонує наступним чином. Зерно надходить із завантажувального бункера 1 через шиберну заслінку 2, що регулює інтенсивність потоку, і потрапляє всередину металевому корпусу 4. Першим елементом взаємодії зернового потоку є верхній край першої розгінної полиці 5, розташованої на фіксованій відстані h під заслінкою.

Рухаючись під дією сили тяжіння, зерно ковзає по розгінній полиці 5, розташованій під спільним кутом α , і поступово прискорюється. Досягнувши її краю, зерно падає на гальмівну полицю 6, розташовану на відстані h нижче. Гальмівні полиці мають пологі кути нахилу (β та γ), тому створюють більший опір тертям, що уповільнює потік та запобігає накопиченню зерна.

Далі процес повторюється: після гальмування зерно падає на наступну розгінну полицю 5, знову набирає швидкість, але на наступній гальмівній полиці 6 швидкість зменшується до рівня, близького до початкового. Завдяки такому чергуванню розгінних (5) і гальмівних (6) ділянок забезпечується

плавний та безпечний рух зерна всередині корпусу 4 та його м'яке вивантаження без ударних навантажень і без ризику зависання.

З вище зазначених способів, каскадний спосіб завантаження силосів зерновим матеріалом є найбільш вдалим. Його необхідно використовувати для завантаження висотних силосних споруд. Хоча потік зернового вантажу по шершавій поверхні характеризується суттєвою просторовою неоднорідністю. Така неоднорідність зумовлює у центральній частині зернового шару найбільшу концентрацію твердої фази та підвищений вміст крупного і щільного зерна. В той же час, на периферійних частинах потоку, які характеризуються підвищеним між зерновим простором, має місце більш висока концентрація легких частинок.

Проведений аналіз завантажувальних пристроїв вказує на те що:

- найбільш розповсюдженими являються гравітаційні завантажувальні пристрої тому, що вони прості у виготовленні і не потребують приводу, але їх ефективність досягається у ємностях середніх розмірів (висота циліндра не більше 5 м);

- завантажувальні пристрої з використанням приводу краще використовувати для ємностей з діаметром перерізу, що перевищує 3 м і обмежується глибиною 3 м;

- для завантаження висотних циліндричних бункерів (висота ємності більше 15 м) необхідно використовувати гофровані рукава з насадками на їх нижній частині пристроїв каскадного спуску.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ СИЛОСУ ЗЕРНОМ

3.1. Особливості функціонування силосних споруд

Відомо, що при зберіганні великих партій зерна широко використовується безтарний спосіб. При цьому використовуються різного роду накопичувальні ємності (силоси, стаціонарні і рухомі бункери і контейнери). Використання безтарного способу зберігання зерна забезпечує стабільність роботи всього технологічного комплексу, до якого відносяться елеваторні підприємства. Цей спосіб дає можливість підвищити ступінь механізації і автоматизації всього елеваторного виробництва. Крім того безтарний спосіб з використанням силосів дає можливість підвищити продуктивність праці, коефіцієнт використання елеваторних ємностей та зводить до мінімуму використання ручної праці на всіх етапах функціонування силосів. Безтарний спосіб зберігання зернового вантажу не потребує пакувальних засобів (наприклад, мішків і т.п.), внаслідок чого знижується втрата зерна під час його збереження.

На елеваторних підприємствах використовуються силоси різної конструкції та різних розмірів. Так, висота силосів може коливатись від 20 до 60 м і вона залежить від несучої здатності зернового або іншого вантажу. Стіна силосу виготовляється із гофрованої оцинкованої сталі, це збільшує міцність конструкції одночасно знижується і її вага. Силоси бувають з конусним дном і призначені для тимчасового зберігання з можливістю випуску сипкого вантажу самопливом, з плоским бетонним дном вони забезпечують довготривале і якісне зберігання зернових, використовуються також мобільні системи зберігання.

Силоси які використовуються на елеваторах мають ряд позитивних якостей, які можуть бути властиві тільки їм. Ці властивості можна розділити на п'ять груп:

- можливість їх поєднання із різноманітним технологічним обладнанням безперервної і дискретної дії;

- можливість складувати в широкому діапазоні об'ємів різного сорту зерна з високим ступенем зберігання ;
- можливість регулювати пропуску здатність випускних отворів;
- низькі енергетичні затрати на завантаження, особливо при гравітаційному завантаженні;
- низькі експлуатаційні затрати.

Відомо, що при експлуатації силосів виникають негативні явища пов'язані із випуском зернового вантажу із ємностей [74,75,76]. При певних умовах, які викликані впливом різних сукупних факторів, випуск зернового вантажу стає нестабільним і може зовсім зупинитись. Подібні явища можуть виникнути якщо відбувається [77]:

- утворення статичних і динамічних склепінь над випускними отворами;
- прилипання зернового вантажу, до стінок ємності;
- ущільнюючий тиск при завантаженні високих ємностей, який визиває стрибкоподібне збільшення тиску в нижній частині ємності в початковий момент;
- не повне використання корисного об'єму;
- втрата початкової якості зернового вантажу внаслідок виникнення такого явища як сегрегація, злежування, травмування, утворення грудків та інших подібних змін в структурі вантажу.

Виникнення таких небажаних явищ приводить до дестабілізації всього технологічного процесу завантаження і розвантаження силосів на елеваторних підприємствах. При цьому збільшується час розвантаження, а значить і час простою рухомого транспорту (наприклад, залізничних вагонів). Відновлення функціонування силосів потребує значних енергетичних затрат, використання важкої ручної праці, що часто приводить до порушення техніки безпеки.

На стабільність функціонування силосів, на сучасних елеваторах [78], чинять вплив певні внутрішні і зовнішні фактори. До внутрішніх відносяться фізико-механічні і біологічні властивості самого вантажу, а до зовнішніх –

умови навколишнього середовища і конструктивно-технологічні параметри силосу та його допоміжні пристрої.

Головним фактором є сипучість зернового вантажу. Волога також чинить суттєвий вплив на плинність вантажу особливо при його випуску. Якщо вологість пшениці перевищує 14,5%, то на її поверхні може появиться волога. Це підвищує коефіцієнт тертя та зчеплення зерен між собою, що в свою чергу знижує сипучість і збільшує кут природного укусу [79]. Сире зерно (вологістю понад 17%) має найгіршу сипучість, що може спричинювати затори в зернопроводах та бункерах [80].

Значний вплив на стабільність функціонування силосів чинять такі фактори як: адгезія, когезія, аутогезія. Ці явища виникають при взаємодії зернового матеріалу із різними поверхнями ємності і між зернівками самого вантажу.

Адгезія відноситься до поверхневих явищ, і характеризує зв'язок між поверхнями самої конструкції силосу і окремими зернівками. Можливість прилипання шару зерна до стінок (особливо випускних отворів) визначається величиною сил адгезії. Тому, для порушення зв'язків, що виникли необхідно використовувати певну зовнішню дію.

Когезія характеризує деякий зв'язок між молекулами сипучого вантажу і при довготривалому зберіганні зерна приводить до появи у ньому однорідних тіл (грудків), що в свою чергу перешкоджає стабільності функціонуванню силосу.

Аутогезія – частіше проявляється при зберіганні травмованого зерна. Вона є основним фактором злежування зернового вантажу. Таке явище може бути при гравітаційному завантаженні силосу зерном. Злежування перешкоджає ефективному випуску зерна із ємності.

На процес функціонування силосів різної конструкції суттєво впливає ущільнення зернового вантажу. Характер ущільнення залежить від способу завантаження, часу і умов зберігання, фізико-механічних і біологічних властивостей самого вантажу. При ущільненні вантажу зростає сила

внутрішнього тертя і початковий опір здвигу. Ріст початкового опору здвигу визиває утворення стійких склепінь над випускними отворами ємностей, що в свою чергу перешкоджає вільному випуску вантажу.

Завантаження зернового вантажу в силоси чинить безпосередній вплив на всі вище згадані процеси. Падаючи із великої висоти, зерно влягається з максимальною щільністю в нижній частині силосу. Щільність укладки вантажу зменшується по мірі заповнення ємності. Ударні і статичні навантаження неоднаково впливають на ущільнення зернового вантажу.

В процесі завантаження силосів спостерігається таке явище, як сегрегація, тобто розшарування зернового вантажу по грануметричному складу. Як правило сегрегація виникає в процесі гравітаційного завантаження силосів. При цьому можна виділити дві характерні ділянки можливого розшарування вантажу.

– ділянка вільного падіння, вона визначається відстанню від завантажувального отвору до поверхні насипу;

– ділянка формування насипу.

На ділянці вільного падіння сипкий вантаж поділяється на фракції. Ступінь розшарування залежить від висоти падіння і фізико-механічних властивостей зернового вантажу. Розшарування вантажу на фракції суттєво впливає на процес його випуску із ємності.

На ділянці формування насипу сегрегація відбувається за рахунок інтенсивного скочування більш важких зернівок до стінок силосу. Для не допущення розшарування зернового вантажу необхідно забезпечити рівномірний розподіл його по всьому периметрі ємності.

3.2.Процес функціонування транспортної системи завантаження силосів зерном на елеваторах

Наглядну картину процесу функціонування транспортної системи завантаження силосів зерном на елеваторі можна зобразити у вигляді параметричної моделі. Така модель дає можливість виявити всі впливові

фактори по етапам транспортування зерна до силосних ємностей, та прослідити місце і роль технологічного процесу, що досліджується.

Транспортна система елеватора знаходиться у робочій вежі, над силосних галереях та в самій силосній споруді. У робочій вежі зерновий вантаж за допомогою норії підіймається у верх де він обробляється і за допомогою горизонтальних транспортерів, котрі знаходяться у над силосних галереях подається до завантажувального пристрою який знаходиться в середині силосу. Розглянемо процес функціонування такої транспортної системи.

Процес завантаження силосів зерном складається із трьох послідовних етапів: на першому етапі відбувається підйом зернового вантажу на певну висоту, на другому етапі зерновий вантаж горизонтальними скребковими транспортерами подається до завантажувальної горловини силосів, а на третьому етапі відбувається завантаження силосів з використанням пристрою який зменшує швидкість руху зернового вантажу.

Наглядну картину функціонування такої транспортної системи дає параметрична модель (рис.3.1). Вона в повній мірі дозволяє розглянути всі фактори котрі впливають на технологічний процес завантаження силосів зерном.

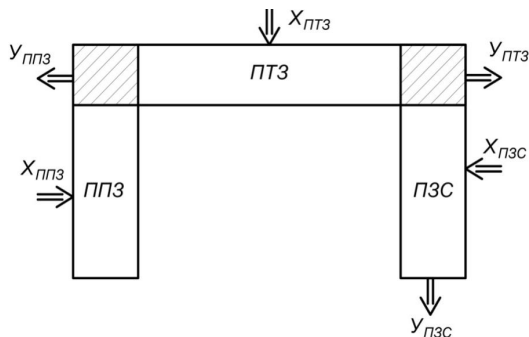


Рисунок 3.1 – Параметрична модель функціонування транспортної системи завантаження силосів зерном

Позначимо три взаємопов'язані процеси транспортування наступним чином: підйом зернового вантажу на необхідну висоту (ППЗ); транспортування зернового вантажу горизонтальними транспортерами у над силосних галереях (ПТЗ); завантаження силосів зерном за допомогою спеціальних гальмівних пристроїв (ПЗС). На кожному етапі на процес транспортування чинять вплив як зовнішні так і внутрішні фактори. До зовнішніх факторів слід віднести, геометричні та кінематичні параметри транспортерів, параметри завантажувальних та перевантажувальних пристроїв, фізико-механічні властивості зернового матеріалу та наслідки попередніх етапів цього технологічного процесу. Вплив факторів на кожному етапі представимо у вигляді функцій [81], аргументами яких являються відповідні фактори, що характеризують травмування, пошкодження або повне руйнування зернівок.

На рис.3.1 представлена параметрична модель функціонування транспортно-завантажувальної системи елеватора. На схемі показані входні параметри: $\bar{X}_{\text{ппз}}$; $\bar{X}_{\text{птз}}$; $\bar{X}_{\text{пзс}}$; де $\bar{X}_{\text{ппз}}$ – описує умови підйому зернового вантажу ковшовим елеватором норії (геометричні параметри ковшів, крок розміщення ковшів на смузі, швидкість руху смуги, фізико-механічні і біохімічні властивості зернового вантажу), $\bar{X}_{\text{птз}}$ - описує процес горизонтального транспортування зернового вантажу у над силосних галереях до завантажувальної горловини силосу (геометрія над силосних галерей, та скребкових транспортерів, фізико-механічні і біохімічні властивості зернового вантажу); $\bar{X}_{\text{пзс}}$ – характеризує рух зернового вантажу в середині силосу (параметри пристрою для обережного завантаження силосу зерном, властивості зернового вантажу).

Ступінь травмування зерна на кожному із виділених етапів оцінюється функціями: $\bar{Y}_{\text{ппз}}$; $\bar{Y}_{\text{птз}}$; $\bar{Y}_{\text{пзс}}$; де $\bar{Y}_{\text{ппз}}$ – виражає вплив ковшів норії на ступінь травмування зерна, $\bar{Y}_{\text{птз}}$ – виражає вплив робочих органів над силосних транспортерів на ступінь ушкодження зерна, $\bar{Y}_{\text{пзс}}$ – описує завершальний процес завантаження силосів зерном.

На процес травмування, пошкодження або повне руйнування зернівок при їх транспортуванні і завантаженні в силоси впливають:

- геометричні параметри транспортних і завантажувальних пристроїв;
- кінематичні параметри ковшових елеваторів і скребкових транспортерів;
- фізико-механічні властивості зернового матеріалу.

При проведенні досліджень ці параметри можна використовувати як для порівняння різних способів транспортно-завантажувальних процесів і пристроїв, так і для окремо взятого пристрою. Фактори, які впливають на цілісність зернового вантажу при роботі ковшового елеватора норії будуть:

- x_{13} – геометричні параметри ковша;
- x_{23} – геометричні параметри верхньої головки норії;
- x_{33} – крок між ковшами на транспортній смузі;
- x_{43} – швидкість руху ковшів;
- x_{53} – зворотне зсіпання зернівок;
- x_{63} – тип завантаження;
- x_{73} – фізико-механічні властивості зерна;
- x_{83} – стискання та защемлення зернівок.

Травмування зерна в норіях відбувається внаслідок отриманого ним імпульсу від різниці векторів напрямків кінетичної енергії зерна і ковшів при їх зіткненні. Під час роботи норій спостерігається ударна дія на зерно: ковзний удар ковшів об верхні шари зерна у нижній головці, удар ковшів об зерно при їх завантаженні, при зіткненні з одночасним ковзанням у верхній головці і «зворотне зсіпання» зерна в холосту гілку. На рис.3.2 представлена схема впливу кінетичних і геометричних параметрів норій на травмування зернівок ковшовими елеваторами.

При зміні конструктивних параметрів x_{13} , x_{23} , x_{33} відбувається зміна кінематичного параметра x_{43} , та зменшуються параметри x_{53} і x_{83} . Із зміною конструктивних параметрів змінюється режим роботи норії, що веде до зменшення ударних сил, а значить і до зменшення травмування зерна.

Перераховані вище фактори комбінуються в залежності від своєї значимості і методики дослідження і вони утворюють функціонал $\bar{X}_{ппз}$.

Вихідні дані процесу вертикального підйому зернового вантажу ковшовими елеваторами оцінюються такими критеріями:

y_{13} – цілісністю або ушкодженням зернівок зернового вантажу;

y_{23} – затратами енергії на піднімання зернового вантажу.

Параметр y_{13} характеризує цілісність зернівок зернового вантажу при розвантаженні його і залежить від конструктивних і кінематичних параметрів норії та від фізико-механічних властивостей зерна.

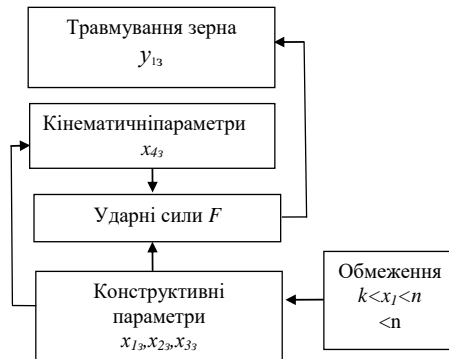


Рисунок 3.2 –Схема впливу кінематичних і геометричних параметрів ковшових елеваторів на травмування зернівок

Транспортування зернового вантажу до горловини силосу здійснюється за допомогою скребкових конвеєрів. На скребкові конвеєри, які знаходяться у над силосних галереях діють такі параметри:

z_{13} –прямий контакт тягового органу скребкового транспортера з корпусними деталями над силосної галереї;

z_{23} – швидкість руху скребкових транспортерів;

z_{33} – тип скребків;

z_{43} – матеріал з якого виготовлені скребки;

z_{53} – фізико-механічні властивості зерна;

Скребокві конвеєри являються стратегічно важливим і, з точки зору надійності і техніко-технологічних параметрів, найбільш прийнятними для елеваторної промисловості [82,83]. Основним недоліком їх є те, що вони травмують зерно, збільшуючи коефіцієнт биття.

Вихідні дані процесу горизонтального транспортування зернового вантажу до завантажувальної горловини силосу оцінюються наступними показниками:

y_{33} – цілісністю або ушкодженням зернівок зернового вантажу;

y_{33} – затратами енергії на рух зернового вантажу до завантажувальної горловини силосу.

Швидкісні режими досить сильно впливають на якість продукту, який транспортується конвеєрами. Природа утворення битого зерна така, зернівки в коробі конвеєра піддаються ударним навантаженням, які визиваються циклічними поштовхами тяговим органом з скребками.

Технологічний процес завантаження силосів зерновим вантажем характеризується наступними параметрами:

ϑ_{13} – наявність або відсутність завантажувального пристрою;

ϑ_{23} – наявністю або відсутністю приводу пристрою;

ϑ_{33} – складністю або простотою виготовленню пристрою;

ϑ_{43} – універсальністю пристрою.

Перераховані вище фактори утворюють функціонал $\bar{X}_{\text{пнз}}$. Вихідні дані процесу заповнення силосів зерном з використанням завантажувальних пристроїв і являється об'єктом нашого дослідження. Основними критеріями являються:

y_{43} – динамічна дія зернового вантажу на нижні шари зернового насипу;

y_{53} – ступінь травмування зерна;

y_{63} – ступінь сегрегації зернового вантажу.

Тоді функціонування силосу можна представити так:

$$\bar{X}_{\text{пнз}} = \bar{X}_{\text{пнз}}(\vartheta_{13}, \dots, \vartheta_{n3}), \quad (3.1)$$

$$\bar{Y}_{\text{ппз}} = \bar{Y}_{\text{ппз}}(y_{43}, \dots, y_{n3}). \quad (3.2)$$

Фактор y_{43} впливає на тривалість зберігання і на стабільність випуску, а фактори y_{53}, y_{63} – на якість кінцевого продукту.

Етапи функціонування транспортної системи елеватора представлені на рис.3.1 у вигляді трьох взаємозв'язаних функціональних блоків. Введемо наступні позначення.

Нехай (x_{13}, \dots, x_{n3}) – параметри, котрі впливають на процес підйому зернового вантажу ковшовими елеваторами. Позначимо S^n – простір цих параметрів, $x_i \in S^n$.

$f(x_{13}, \dots, x_{n3})$ – вектор – функція, яка описує процес підйому зернового вантажу норіями.

$$f(x_{13}, \dots, x_{n3}) = (y_{i3}, \dots, y_{k3}); \quad (3.3)$$

де

$$y_{i3} = y_{i3}(x_{13}, \dots, x_{k3}), i = 1 \dots k. \quad (3.4)$$

Вихідні параметри по підйому зернового вантажу y_{13}, y_{23} можна представити множиною $y_i \in S^k$. Виходячи із цього видно, що початкові параметри діють певним чином на вихідний параметр і це можна представити так:

$$S^n \xrightarrow{f_1} S^k. \quad (3.5)$$

Після підйому зернового вантажу, параметри (y_{i3}, \dots, y_{k3}) починають впливати на процес транспортування зернового вантажу скребковими транспортерами (вони стають внутрішніми параметрами) і до них приєднуються зовнішні параметри (z_{13}, \dots, z_{m3}) . Позначимо простір зовнішніх параметрів $z_{i3} \in S^m$. Це значить, що на процес руху зернового вантажу в над силосних галереях впливають параметри із добутку просторів $S^k \times S^m$.

Функція, яка описує процес транспортування зернового вантажу у над силосних галереях елеватора :

$$f(x_{13}, \dots, x_{n3}, z_{13}, \dots, z_{m3}) = (h_1, \dots, h_{i3}), \quad (3.6)$$

$$p_i = p_i(y_{i3}, \dots, y_{k3}, z_{13}, \dots, z_{m3}), h_i \in S^l \quad (3.7)$$

Виходячи з проведених досліджень можна процес транспортування зерна у над силосних галереях представити так:

$$S^k \times S^m \xrightarrow{f_2} S^l \quad (3.8)$$

Завантаження силосів зерном являється важливою ланкою в процесі функціонування ємності. Завантаження чинить великий вплив на увесь технологічний процес і на якість кінцевого продукту.

Нехай $(\vartheta_{13}, \dots, \vartheta_{r3})$ – параметри, які впливають на сам процес завантаження силосів зерном, характеристик завантажувальних пристроїв $(\vartheta_{13}, \dots, \vartheta_{r3}) \in S^h$. На процес завантаження також впливають і параметри $(h_1, \dots, h_{l3}) \in S^l$, котрі пов'язані із горизонтальним транспортуванням зернового вантажу скребковими транспортерами.

Тоді функція, котра описує процес завантаження силосів зерном із використанням завантажувальних пристроїв буде:

$$g((h_1, \dots, h_{l3}, \vartheta_{13}, \dots, \vartheta_{r3})) = Y, \quad (3.9)$$

де Y – вихідний параметр, по якому оцінюється ступінь травмування зерна при його завантаженні у силос.

Процес завантаження можна представити:

$$S^l \times S^h \xrightarrow{f_3} S, \quad (3.10)$$

де S – простір розмірності одиниці.

З'єднавши формули (3.5), (3.8) і (3.10) в послідовний ланцюг, отримаємо математичну модель функціонування транспортної системи завантаження силосів на сучасних елеваторних підприємствах.

$$\begin{aligned} S^n &\xrightarrow{f_1} S^k. \\ S^k \times S^m &\xrightarrow{f_2} S^l. \\ S^l \times S^h &\xrightarrow{f_3} S \end{aligned} \quad (3.11)$$

Якщо всі зовнішні параметри, які впливають на травмування зерна винести на початок технологічного процесу завантаження силосів зерном, то модель буде мати такий вид:

$$S^N \xrightarrow{f_1} S^K \xrightarrow{f_2} S^L \xrightarrow{f_3} S, \quad (3.12)$$

де $N \neq n, K \neq k, L \neq l$.

На практиці при дослідженні процесу завантаження силосів зерном використовувались вхідні параметри завантажувального пристрою та фізико-механічні властивості зернового вантажу.

Вибір перетворень f_1, f_2, f_3 при оцінці ефективності функціонування транспортної системи елеватора можна провести методами класичної кваліметрії [84]. Для транспортної системи елеватора всі перетворення будуть лінійними. Тому задача по дослідженню травмуванню зерна під час його завантаження у силоси зводиться до традиційної задачі лінійної алгебри.

Таким чином, які б не були функції f_1, f_2, f_3 , їх числове подання завжди виконується, але основною задачею є вірний підбір параметрів завантажувальної системи силосів, котрі впливають на увесь процес завантаження силосів зерном і дають можливість зменшити травмування зерна.

3.3. Математичне моделювання ударної взаємодії зерна об бетонне дно силосу

3.3.1. Визначення силових характеристик зерна при ударі його об нерухому перешкоду

Ударна взаємодія зерна з іншими твердими тілами під час його завантаження в силоси, приводить до виникнення місцевих контактних деформацій та максимального тиску в місці контакту зернівки з бетонним дном силосу. Під час удару в зернівках можуть з'явитись мікротріщини, зломи, вм'ятини, та інші ушкодження [85]. Для того, щоб зменшити ці ушкодження або повністю їх позбутись необхідно у середині силосів встановлювати

спеціальні пристрої за допомогою яких можна зменшити висоту падіння та швидкість руху зернівок.

Бетонне дно силосу являється пласкою абсолютно твердою поверхнею, яку приймаємо за пружний півпростір, утворений горизонтальною площиною із своїм коефіцієнтами Юнга і Пуансона. Для моделювання ударної взаємодії зерна була використана класична теорія удару Герца, яка дає можливість визначити місцеві деформації та контактні напруження, що виникають в окремих зернівках [86,87,88]. Вибір цієї теорії пояснюється незначними деформаціями зерна під час його удару об бетон, які є в'язко-пружними.

Прийнявши те, що дія сили тяжіння на зерно, через його незначну масу та швидкість під час удару є незначною та нею можна знехтувати. Контактне зближення тіл після зіткнення $x=x(t)$ за теорією Герца описуємо диференціальним рівнянням:

$$mx'' = -cx^{\frac{3}{2}}, \quad (3.13)$$

де c – константа, значення якої у нашому випадку визначається радіусами кривизни сферичної поверхні зерна і пласкої бетонної поверхні та відповідними пружними властивостями матеріалу.

Згідно з теорією Герца та [86,87,89] маємо:

$$c = \frac{4\sqrt{R_1}}{3Q} \cdot \frac{\left(1 + \frac{3}{8}\varepsilon^2 + \frac{15}{64}\varepsilon^4\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(1 + \frac{\varepsilon^2}{4} + \frac{9\varepsilon^4}{64} + \frac{25\varepsilon^6}{256}\right)^{\frac{3}{2}}},$$

$$Q = \frac{1-\mu^2}{E} + \frac{1-\mu_n^2}{E_n},$$

$$\varepsilon^2 = \sqrt{\frac{16\left(5+\frac{R_2}{R_1}\right)^2}{9\left(3+\frac{R_2}{R_1}\right)^2} + \frac{64\left(1-\frac{R_2}{R_1}\right)}{3\left(3+\frac{R_2}{R_1}\right)} - \frac{4\left(5+\frac{R_2}{R_1}\right)}{3\left(3+\frac{R_2}{R_1}\right)}}, \quad (3.14)$$

де m – маса зернини,

$E; \mu$ – модуль пружності і коефіцієнт Пуансона зернівки;

$R_1 \geq R_2$ – радіуси кривизни зерна;

E_n , μ_n –модуль пружності і коефіцієнт Пуассона горизонтальної поверхні контакту.

З диференціального рівняння (3.13) знайдена формула швидкості руху зерна:

$$\begin{aligned}x'' &= \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx}; \\v \frac{dv}{dx} &= \frac{-c}{m} x^{\frac{3}{2}}; \\v dv &= \left(\frac{-c}{m} x^{\frac{3}{2}}\right) dx.\end{aligned}\tag{3.15}$$

Проінтегрувавши обидві частини рівняння (3.15):

$$\begin{aligned}\frac{v^2}{2} + c_1 &= c_2 - \frac{2c}{5m} x^{\frac{5}{2}}; \\ \frac{dx}{dt} &= \sqrt{2c_2 - c_1 - \frac{4c}{5m} x^{\frac{5}{2}}}.\end{aligned}\tag{3.16}$$

Увівши в (3.16) початкові умови:

$$\begin{cases} x(0) = 0 \\ x'(0) = v' \end{cases},$$

де v – швидкість зіткнення тіл, яка враховує початкову швидкість зерна V_0 .

З урахуванням початкових даних отримана формула:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sqrt{v^2 - \frac{4c}{5m} x^{\frac{5}{2}}}; \\ \frac{dx}{dt} &= v \sqrt{1 - \frac{4c}{5mv^2} x^{\frac{5}{2}}}\end{aligned}\tag{3.17}$$

Використовуючи (3.17) отримано рівняння за допомогою якого визначається максимальне зближення тіл при ударі:

$$1 - \frac{4c}{5mv^2} \gamma^{\frac{5}{2}}$$

Звідси

$$\gamma = \sqrt[5]{\left(\frac{5mv^2}{4c}\right)^2} = \left(\frac{5mv^2}{4c}\right)^{\frac{2}{5}}.\tag{3.18}$$

За допомогою інтегрування (3.17) на проміжку $[0; \gamma]$ та враховуючи (3.18) визначений час ударної взаємодії t зернівок з нерухомою перешкодою:

$$dt = \frac{2dx}{v \sqrt{1 - \frac{4c}{5mv^2} x^2}},$$

$$t = \frac{2}{v} \int_0^Y \frac{dx}{\sqrt{1 - \frac{4c}{5mv^2} x^2}}. \quad (3.19)$$

Після підстановки(3.18) в (3.19) отримана формула для визначення часу ударної взаємодії зернівок:

$$t = \frac{2}{v} \int_0^Y \frac{dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{Y}\right)^2}}. \quad (3.20)$$

Ввівши в (3.20) заміну $y = x/Y$, отримана кінцева формула часу:

$$t = \frac{2Y}{v} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-y^2}} = \frac{2Y}{v} \int_0^1 \left(1 - y^2\right)^{-\frac{1}{2}} dx = \frac{2Y}{v} I. \quad (3.21)$$

$$\text{де } I = \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-y^2}}.$$

Для подальшого розв'язку підінтегральна функція рівняння (3.21) переписана з використанням ряду Маклорена:

$$I = \int_0^1 \left(\frac{1 + \frac{1}{2 \cdot 1!} y^2 + \frac{3}{4!} \left(y^2\right)^2 + \frac{15}{8 \cdot 3!} \left(y^2\right)^3 + \frac{105}{16 \cdot 4!} \left(y^2\right)^4 + \dots + 0,5 \cdot (0,5+1) \dots (0,5+(n-1))}{n!} \times \left(y^2\right)^n \right) dx \quad (3.22)$$

Після інтегрування (3.22) визначена величина підінтегральної функції I :

$$I = \left(y + \frac{y^2}{7 \cdot 1!} + \frac{3y^2}{29 \cdot 2!} + \frac{15y^2}{133 \cdot 3!} + \frac{105y^2}{641 \cdot 4!} + \frac{945y^2}{3157 \cdot 5!} + \frac{10395y^2}{15689 \cdot 6!} + \frac{135135y^2}{78253 \cdot 7!} + \dots \right) \Bigg|_0^1$$

$$\approx 1 + 0,14285 + 0,05172 + 0,01879 + 0,00682 + 0,00249 + 0,00092 + 0,00034 + 0,00012 \approx 1,224.$$

Підставивши $I = 1,224$ у формулу (3.21) отримаємо з точністю 0,0001 час ударної взаємодії зернівки об пласке дно силосу.

$$t = 2,448 \frac{Y}{v}, \quad (3.23)$$

Знаючи уівраховуючи (3.18), отримана формула для визначеннямаксимальної сили контактної взаємодії зернівки об бетонне дно силосу F_{max} :

$$F_{max} = c\gamma^{\frac{3}{2}}. \quad (3.24)$$

Максимальний тиск визначається за формулою:

$$P_{max} = \frac{3F_{max}}{2\pi\sigma_{max}b_{max}}, \quad (3.25)$$

де

$$\sigma_{max} = \left(\frac{3}{4}QF_{max}R_1\left(1 + \frac{3}{8}\varepsilon^2 + \frac{15}{64}\varepsilon^4\right)\right)^{\frac{1}{3}};$$

$$b_{max} = \sigma_{max}\sqrt{1 - \varepsilon^2}. \quad (3.26)$$

Максимальний тиск, який виникає при контактній взаємодії зерна з абсолютно твердим пласким тілом відповідає внутрішнім напруженням, які виникають у самій зерніні у точці контакту. Обчисливши максимальний тиск при контакті зерна та порівнявши його з середньстатистичною границею його міцності σ_{max} можна оцінити ступінь його травмування.

Очевидно, що при $P_{max} > \sigma_{max}$, виникає деформація зерна, а отже і його травмування. Вид та ступінь деформації зернової маси залежить від ступеня перевищення $P_{max} \gg \sigma_{max}$.

3.3.2. Обчислення основних характеристик ударної взаємодії тиениці при падінні їїнабетоннуоснову силосу

Для проведення розрахунків прийняті наступні усереднені дані для озимого зерна пшениці та пласкої бетонної поверхні силосу [88]:

$$R_1 = 0,006 \text{ м}, R_2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3, m = 4 \cdot 10^{-5} \text{ кг}, E = 26 \cdot 10^6 \text{ Па}, E_n = 2 \cdot 10^{10} \text{ Па},$$

$$\mu = 0,12, \mu_n = 0,17, h = 26 \text{ м}, V_0 = 0,65 \text{ м/с}, v = V_0 + \sqrt{2gh} \text{ м/с}.$$

Згідно з наведеними вихідними даними за допомогою формули (3.14) визначені наступні параметри:

$$\varepsilon^2 = 0,9384, Q = 3,796 \cdot 10^{-8} \text{ Па}, c = 1,967 \cdot 10^6 \text{ м}^{\frac{1}{2}}/\text{Па}.$$

За допомогою формул (3.18) та (3.23 – 3.26) визначені основні параметри взаємодії зернівки із бетонним дном силосу:

$$\gamma = 7,158 \cdot 10^{-4} \text{ м}, t = 7,545 \cdot 10^{-5} \text{ с}, F_{\max} = 37,67 \text{ Н}, a_{\max} = 2,156 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \\ b_{\max} = 5,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}, P_{\max} = 15,598 \text{ МПа}.$$

Водночас границя міцності для озимого зерна пшениці в середньому складає $\sigma_{\max} = 5 \text{ МПа}$. Порівнюючи σ_{\max} із отриманими результатами бачимо, що максимальний тиск при падінні озимого зерна пшениці на бетон у точці контакту є значно більшим максимально допустимого значення $P_{\max} \gg \sigma_{\max}$.

Для визначення сили механічного удару та порівняння границь міцності озимого зерна пшениці з теоретичними розрахунками використовувався цифровий мобільний пристрій (додаток 1).

Згідно із проведеним дослідженням при загрузці озимої пшениці у силос її нижні шари травмуються внаслідок виникнення пружно-пластичної деформації зерен при їх точковому контакті з бетоном. Це, у свою чергу, може призводити до псування нижніх слоїв озимої пшениці під час його зберігання у силосі.

3.4. Математичне моделювання ударної взаємодії між окремими зернівками зернового потоку

Рух зернового матеріалу по периферійному відкритому гвинтовому каналі (ПВГК), який встановлюється на внутрішній боковій поверхні силосу (рис. 2.19), відбувається за рахунок гравітації та взаємного обміну ударними імпульсами між окремими зернівками зернового потоку. Режим руху сипкого зернового потоку регламентується фізико-механічними властивостями зерна, котре завантажується у силос. Поверхня зерна, яке завантажується, може бути гладкою або глянцевою, шершавою, ребристою, горбистою та зморшкуватою [90]. Ці властивості зерна дуже впливають на режим руху сипкого зернового матеріалу.

Розглянемо процес співудару двох зернівок масою m_s , які знаходяться у елементарному об'ємі зернового потоку і розганяються. Розрахункова схема процесу пружного співудару двох зернівок пшениці наведена на рис.3.3.

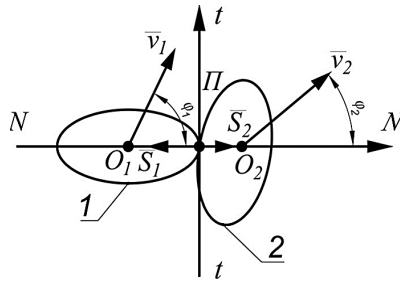


Рисунок 3.3 – Схема ударної взаємодії двох зернівок пшениці

Для спрощення процесу переміщення окремих зернівок пшениці по робочій поверхні гвинтового каналу були прийняті наступні обмеження: лінія центрів (O_1O_2) співпадає із лінією дії імпульсів ($N - N$), швидкості центрів мас зернівок \bar{v}_1 і \bar{v}_2 не лежать на лінії (O_1O_2), а направлені під деякими кутами φ_1 і φ_2 до неї; крім того в процесі зсувного руху зернівки зберігають свою масу і форму.

Провівши через точку дотику двох зернівок (Π) загальну дотичну $t - t$, яка буде перпендикулярною до загальної нормалі ($N - N$). Ці лінії утворюють систему координат з центром в точці Π . Для визначення ударних імпульсів позначимо одиничні вектори, які знаходяться на лініях $N - N$ і $t - t$ відповідно через \bar{i} і \bar{j} . Тоді ударний імпульс який діє на першу зернівку буде: $S_1 = S \cdot \bar{i}_1$, а на другу $S_2 = S \cdot \bar{i}_2$.

Швидкість першої зернівки під час розгону її до удару з другою зернівкою буде:

$$\bar{v}_1 = v_{1x_1} \cdot \bar{i}_1 + v_{1y_1} \cdot \bar{j}_1, \quad (3.27)$$

$$\text{де } v_{1x_1} = -v_1 \cdot \cos \varphi_1;$$

$$v_{1y_1} = v_1 \cdot \sin \varphi_1.$$

Швидкість другої зернівки під час розгону її до удару з першою зернівкою буде:

$$\bar{v}_2 = v_{2x_2} \cdot \bar{t}_2 + v_{2y_2} \cdot \bar{j}_2, \quad (3.28)$$

де $v_{2x_2} = v_2 \cdot \cos \varphi_2$;

$$v_{2y_2} = v_2 \cdot \sin \varphi_2.$$

Для того, щоб перша зернівка ударила другу необхідно, щоб кут між лінією $t - \bar{t}$ і лінією $N - N$ знаходився в межах від 0 до 90° [91,92]. В нашому випадку він рівний 90° .

При подальшому розгляді процесу співудару двох зернівок зробимо наступне припущення, зернівки, що ударяються мають ідеально гладкі поверхні. Це приводить до того, що після удару вони не обертаються, тобто зернівки рухаються у зерновому потоці поступально. В такому разі у відповідності до гіпотези Гауса [89,92] між дотичними і нормальними імпульсами існує певний зв'язок, котрий описується виразом:

$$\Delta u = -u' \cdot f(1 + k), \quad (3.29)$$

де Δu – зміна відносної дотичної швидкості;

u' – швидкість флуктації (хаотичного руху) зернового матеріалу у вибраному елементарному об'ємі;

f – коефіцієнт тертя ковзання між окремими зернівками під час поступального руху по ПВГК;

k – коефіцієнт відновлення.

Коефіцієнт відновлення за косоного співудару двох окремих зернівок масою m_3 згідно з [19] характеризується зміною швидкостей до удару і після удару:

$$k = \frac{v'_{1x} - v'_{2x}}{v_1 \cdot \cos \varphi_1 - v_2 \cdot \cos \varphi_2}, \quad (3.30)$$

де v_1, v_2 – відповідно, швидкість першої і другої зернівок до їх співудару;

v'_{1x}, v'_{2x} – швидкість першої і другої зернівок після співудару відповідно.

Плоский косо центральний удар може відбутись тоді, коли $\frac{\pi}{2} < \varphi_1 < \frac{3\pi}{2}$, $-\frac{\pi}{2} < \varphi_2 < \frac{\pi}{2}$ [92]. Виходячи із цих умов і маючи на увазі, що для мас $m_{31} =$

m_{3_2} була визначена відносна дотична швидкість, зернівки при її співударі з іншою зернівкою:

$$\Delta u = v_1 \cdot \sin \varphi_1 \pm v_2 \sin \varphi_2 \quad (3.31)$$

Тоді підставивши (3.30) і (3.31) в (3.29) була отримана формулу для визначення швидкості флуктації зернівок при їх співударі:

$$u' = -\frac{\Delta u}{f(1+k)} = -\frac{v_1 \cdot \sin \varphi_1 \pm v_2 \sin \varphi_2}{f \left(\frac{v_1 \cos \varphi_1 - v_2 \cos \varphi_2 + v_1' x - v_2' x}{v_1 \cos \varphi_1 - v_2 \cos \varphi_2} \right)}. \quad (3.32)$$

Відомо, що рух окремих зернівок у потоці ПВГК має досить складний функціональний характер [92]. З цього виходить, що сумарна кінетична енергія взаємного зсуву двох зернівок масою m_3 можна представити у вигляді суми двох енергій: поступального і хаотичного (флуктаційного) рухів зерна у периферійному відкритому гвинтовому каналі.

$$T_{\text{сум.}} = T_{\text{пос.}} + T_{\text{хаот.}}, \quad (3.33)$$

де $T_{\text{пос.}}$ – кінетична енергія поступального руху зернівок уздовж гвинтового каналу;

$T_{\text{хаот}}$ – кінетична енергія хаотичного руху зернівок по відкритому гвинтовому каналу.

Складові сумарної кінетичної енергії визначаються із наступних виразів:

$$\begin{cases} T_{\text{пос}} = \frac{1}{2} m_3 (\Delta x)^2 \left(\frac{du}{dx} \right)^2 \\ T_{\text{хаот}} = \frac{1}{2} m_3 (u')^2 \end{cases}, \quad (3.34)$$

де $\Delta x = (b_1 - b_2)$ – різниця координат центрів ваги першої і другої зернівок;

$\left(\frac{du}{dx} \right)$ – швидкість переміщення сипкого зернового матеріалу уздовж відкритого гвинтового каналу.

Підставивши (3.34) у (3.33) і врахувавши, що $m_3 = V_3 \rho_3$ отримаємо:

$$T_{\text{сум}} = 0,5 V_3 \rho_3 [(b_1 - b_2)^2 \left(\frac{du}{dx} \right)^2 + (u')^2], \quad (3.35)$$

де V_3 – об'єм i – ї зернівки;

ρ – насипна щільність зерна.

Під час зсувного руху зернового матеріалу по розгінній ділянці і особливо при переході із розгінної на гальмівну ділянку зернівки увесь час ударяються одна із одною. Середню частоту їх співударів можна визначити скориставшись формулою Аккермана-Шена [93]:

$$\gamma_3 = \frac{\tau \cdot du}{E_c n_3 dx}, \quad (3.36)$$

де n_3 — загальна кількість зернівок у виділеному об'ємі;

τ — напруження при гравітаційному зсуві зернового матеріалу уздовж ПВГК;

E_c — дисипація кінетичної енергії при одному співударі двох зернівок.

Дисипація кінетичної енергії визначається [93]:

$$E_c = \frac{1}{2} m_3 c^2 \left(\frac{1-k^2}{4} + \frac{\mu(1+k)}{\pi} - \frac{\mu^2(1+k^2)}{4} \right) (u')^2 \quad (3.37)$$

Або

$$E_c = \frac{1}{2} m_3 c^2 e_3 (u')^2, \quad (3.38)$$

де e_3 — відносна частка кінетичної енергії однієї зернівки, яка дисипатує при кожному зіткненні з іншими зернівками у зерновому шарі.

Підставивши значення (3.38) і (3.32) в (3.36) отримуємо формулу для визначення середньої частоти співудару зернівок у сипкому зерновому середовищі при їх косо центральному ударі на розгінній ділянці гравітаційної установки.

$$\gamma_3 = \frac{2\tau \left(\frac{\vartheta_1 \cos \alpha_1 - \vartheta_2 \cos \alpha_2 + \vartheta'_{1x} - \vartheta'_{2x}}{\vartheta_1 \cos \alpha_1 - \vartheta_2 \cos \alpha_2} \right)^2 du}{f^2 m_3 n_3 e_c (\vartheta_1 \sin \alpha_1 \pm \vartheta_2 \sin \alpha_2)^2 dx} \quad (3.39)$$

Одержані залежності швидкості флуктації зернівок при їх ударі (3.32) і середньої частоти співударів (3.39) можуть бути використані для подальшого аналізу та обґрунтування параметрів технологічного процесу завантаження силосів зерном з використанням ПВГК.

3.5. Ударна взаємодія падаючої зернівки нанерухомуоснову

3.5.1. Математичне моделювання процесу взаємодії зерна кукурудзи з бетонним дном силосу

При завантаженні силосів зерновим матеріалом окремі зернівки цього вантажу досягнувши дна отримують максимальну лінійну швидкість. Вона визначається за формулою $v_k = \sqrt{2gH}$, де H – висота з якої зерно скидається на дно силосу. Зернівки впавши на бетонне дно відскакують від нього на деяку висоту h . Таких відскоків зернівки може бути декілька, але перша є найважливішою. Це означає що при першому падінні з висоти H на бетонне дно силосу зернівка отримує максимальний удар, при цьому вона може травмуватися або повністю зруйнуватися. Пошкоджені таким чином зернівки накопичуються в нижній частині ємності, що в свою чергу призводить до самозигрівання і розвитку шкідливих мікроорганізмів. Це означає, що в нижніх шарах можливе відбуватись псування або повна загибель зерна яка зберігається в силосі.

Розглянемо можливі варіанти падіння зернівки кукурудзи на дно силосної споруди. На рис.3.4 показані чотири варіанти зіткнення зернівки кукурудзи різними своїми частинами з нерухомою основою силосу. Так на рис.3.4,а при зіткненні з нерухомою основою центр ваги зернівки зміщений по відношенню до напрямку дії реакції на величину l . Внаслідок чого, на нашу думку, зернівка отримує не тільки вертикальну швидкість v_0 , а й кутову ω . Ці швидкості приводять до того, що зернівка відскакує від перешкоди в різні та непередбачувані напрямки. При інших зіткненнях (рис.3.4,б,в,г) як правило зернівки відскакують в гору з можливим відхиленням від вертикалі

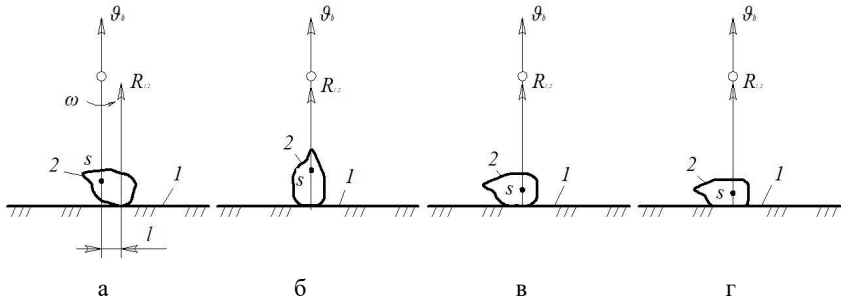


Рисунок 3.4 – Можливі варіанти зіткнення зернівки кукурудзи з бетонним дном силосу: 1– масивне дно силосу; 2 – зернівка кукурудзи

Розглянемо випадок коли зернівка кукурудзи відскакує вертикально вгору. На рис.3.5 показано падіння зернівки на бетонне дно із швидкістю g_{s2} з подальшим відскоком в гору зі швидкістю g_s . При такому падінні кінетична енергія зернівки повністю переходить в енергію її деформації. Ця деформація викликає в зернівці ударні хвилі, які інтенсивно розповсюджуються в середині зернівки. Чим інтенсивніші деформаційні хвилі тим нижча стійкість зернин до травмування.

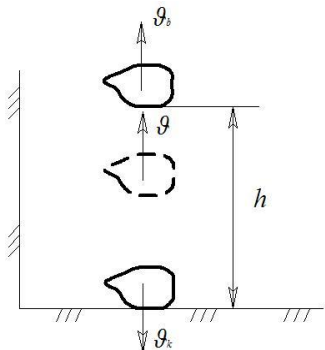


Рисунок 3.5 – Падіння зернівки кукурудзи на дно силосу з подальшим вертикальним відскоком на висоту h

Відомо що на початковій стадії завантаження силосів зерном відбувається його найбільше ушкодження. Ступінь травмування зернівок в цей час напряму залежить від швидкості руху зернівок і висоти падіння [94].

Умови при яких відбувається процес руйнування зернівок, наприклад, кукурудзи при їх ударній взаємодії із нерухомою перешкодою теоретично описуються за допомогою теорії удару. В науковій літературі існує багато визначень що таке механічний удар. В дисципліні опір матеріалів ударом називають процес короточасної взаємодії одного тіла з іншим, при якій відбувається перехід кінетичної енергії цих тіл в енергію деформації [89, 94].

При падінні зернівки кукурудзи на дно силосу її кінетична енергія переходить в потенціальну енергію самої зернівки. Тоді:

$$T_n - T_k = U, \quad (3.40)$$

де T_n і T_k – відповідно кінетична енергія зернівки кукурудзи до її удару і після удару об нерухому перешкоду, Дж;

U – потенціальна енергія деформації, Дж.

Кінетична енергія зернівки в момент її зіткнення з перешкодою визначається за формулою:

$$T_n = m_z \cdot g \cdot H, \quad (3.41)$$

де m_z – маса зернівки кукурудзи, кг;

H – висота з якої зернівка падає на бетонне дно силосу, м.

Після зіткнення зернівки з основою силосу швидкість її змінюється за величиною і напрямком. Швидкість відскоку зв'язана із швидкістю з якою зернівка падає на дно силосу таким співвідношенням.

$$v_g = v_k \cdot \kappa_g, \quad (3.42)$$

де κ_g – коефіцієнт відновлення.

Розглянемо падіння зернівки, яке зображено на рисунку 3.4,а. Кінетична енергія зернівки після її відскоку від масивної перешкоди буде дорівнювати:

$$T_k = \frac{m_z \cdot v_g^2}{2} + \frac{I_s \cdot \omega^2}{2}, \quad (3.43)$$

де I_s – момент інерції зернівки, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Підставивши отримані вирази в рівняння енергетичного балансу (3.40), та провівши деякі перетворення і врахувавши, що $I_3 = m_3 \cdot l^2$ отримаємо рівняння потенціальної енергії, яка накопичується зернівкою кукурудзи і бетонним дном силосу.

$$U = m_3 [gH (1 - k_B^2) - 0,5 l^2 \omega^2]. \quad (3.44)$$

З отриманої формули видно, що потенціальна енергія деформації зернівки залежить від маси зернівки та швидкості падіння.

Потенціальна енергія деформації зернівки кукурудзи визначається за формулою:

$$U_3 = \frac{F_{y\partial} \Delta y}{2}, \quad (3.45)$$

де U_3 – потенціальна енергія деформації зернівки пшениці, Дж;

$F_{y\partial}$ – максимальна ударна сила зернівки об нерухому основу, Н;

Δy – абсолютна деформація зернівки, м.

Відомо, що абсолютна деформація зернівки зв'язана з її розмірами і жорсткістю таким виразом:

$$\Delta y = \frac{F_{y\partial} \cdot a}{E_3 \cdot S_3}, \quad (3.46)$$

де a – товщина зернівки кукурудзи в місці удару ($a = 2,5\text{--}3$ мм);

E_3 – модуль Юнга ($E_3 = 24,8\text{--}27,0$ МПа);

S_3 – площа деформованої поверхні зернівки кукурудзи ($S_3 = 0,000007\text{...}0,000008$ м²).

Підставивши формулу (3.46) у формулу (3.45) отримаємо:

$$U_3 = \frac{F_{y\partial}^2 \cdot a}{2 \cdot E_3 \cdot S_3}. \quad (3.47)$$

Отримані залежності дозволяють визначити накопичену потенціальну енергію і фактори, котрі на неї впливають. Це дає можливість усвідомити і намітити шляхи зменшення ударної взаємодії зернівок з масивною перешкодою.

3.5.2. Експериментальні дослідження падіння зернівок кукурудзи на бетонну основу

При падінні зерна кукурудзи на масивне бетонне дно силосу відбувається удар в результаті якого в місці удару виникає деформація зернівки. Величина її залежить від маси зернівки і швидкості з якої вона ударяється об основу силосу. Удар зернівки об перешкоду призводить до того, що в середині зернівки утворюються ударні хвилі. Ці хвилі інтенсивно розповсюджуються по всьому об'єму зернівки. Швидкість розповсюдження ударних хвиль з деяким припущенням можна визначити за формулою:

$$c = \sqrt{\frac{E_{\text{зер}}}{\rho}}, \quad (3.48)$$

де $E_{\text{зер}}$ – напруга яка виникає в зоні контакту зернівки кукурудзи в зоні її контакту з бетонною основою силосу, МПа;

ρ – комплексний показник який характеризує стан зернівки при її деформації, МПа·с²·м⁻⁴.

Час розповсюдження ударної хвилі по всій зернівці визначається, шляхом ділення довжини зернівки на швидкість c . Тоді, загальна тривалість удару зернівки об перешкоду буде:

$$\tau = \frac{2 \cdot b}{c}, \quad (3.49)$$

де b – довжина зернівки у місці зіткнення із перешкодою, м.

Приклад: Визначимо ударні характеристики падаючої зернівки на бетонне дно силосу. Для зернівки кукурудзи прийемо, що $E_s = 26$ МПа, $b = 0,009$ м,

$$\rho = 0,00215 \text{ МПа} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-4}.$$

Тоді за формулою (3.48) швидкість розповсюдження ударного імпульсу в зернівці кукурудзи котра падає з висоти $H = 30$ м і масою $m_s = 0,28$ грам становить $c = 110$ м/с., що приблизно в чотири рази більше ніж g_k . При цьому загальна тривалість удару $\tau = 0,00016$ с.

Провівши експериментальні дослідження по падінню зернівок кукурудзи на бетонну основу з використанням фото фіксації, були виявлені середні величини відскоку зернівки від перешкоди при її скиданні з різної висоти. На

рис.3.6 наведений графік залежності відскоку зернівки кукурудзи від висоти скидання її на нерухому бетонну основу.

По результатам дослідження були визначені коефіцієнти відновлення для вибраних висот з яких скидалися зернівки кукурудзи. Так, для $H = 400$ мм, $\kappa_g = 0,525$, а для $H = 1000$ мм, $\kappa_g = 0,435$. Середнє значення коефіцієнта відновлення становить $\kappa_g = 0,455$.

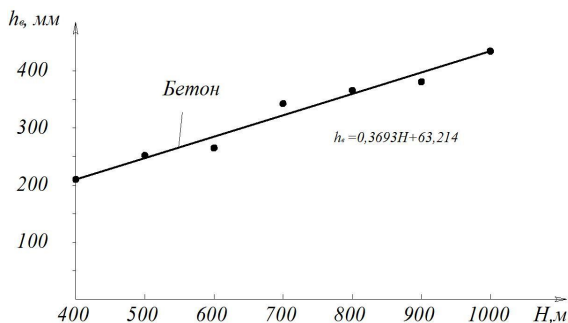


Рисунок 3.6 – Взаємодія насіння кукурудзи при її падінні на бетонну основу

Подальшими дослідженнями було встановлено, що потенціальна енергія зерна кукурудзи одного і того ж сорту з однаковими фізико-механічними властивостями скинутих з різної висоти збільшується. На рис.3.7 приведений графік зміни потенціальної енергії падаючої зернівки кукурудзи на бетонну основу силосу.

З графіка видно, що потенціальна енергія при падінні зернівки кукурудзи на бетонне дно силосу зростає із зростанням висоти падіння. Для зменшення потенціальної енергії необхідно на певних висотах встановлювати гальмівні пристрої. За допомогою цих пристроїв можна плавно регулювати швидкість руху зерна на дно силосу. Такі заходи необхідно виконувати з мінімальними затратами. Встановлені пристрої для зменшення швидкості завантаження зерна приводять до зниженню деформації зернівок, а значить і до зменшення їх травмування.

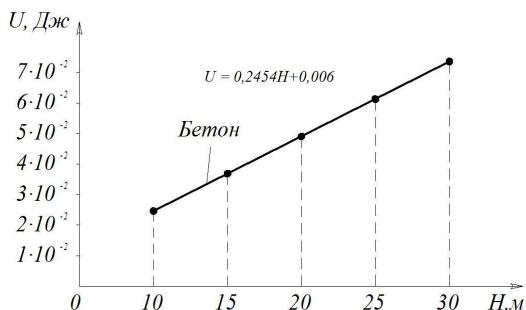


Рисунок 3.7 – Зміна потенціальної енергії зернівки кукурудзи котра падає на бетонне дно силосу з різної висоти

З метою зниження ступені травмування зернівок зернового вантажу кукурудзи на початковій стадії завантаження силосів необхідно створити такі умови при яких частина кінетичної енергії удару зернівок об масивне бетонне дно переходила б в потенціальну енергію робочого органу гальмівного пристрою.

Для зменшення травмування зернівок сипкого зернового вантажу в середині силосу необхідно встановити гофрований рукав з можливістю його опускання і підймання, а на нижній частині цього рукава закріпити завантажувальний пристрій конусного типу диски якого покриті еластичним матеріалом (наприклад, гумою).

3.6. Математичне моделювання косого удару падаючої зернівки пшениці на нерухому основу

3.6.1. Ударна взаємодія зерна пшениці з бетонним дном силосу

Зниження ударної взаємодії зерна з робочими органами машин і механізмів являється одним із показників технічного рівня сучасного сільськогосподарського виробництва. Тому дослідженню таких ударних взаємодій присвячено багато наукових публікацій [85,87,95,96,97].

Питання передачі енергії удару, визначення імпульсів сил, коефіцієнтів відновлення і відскоку при падінні зерна на бетонне дно силосів не достатньо вивчені. Це пов'язано з тим, що зерновий вантаж за допомогою над силосних транспортерів подається з певною лінійною швидкістю до завантажувального отвору силосу. Тобто падаюче на бетонне дно зерно уже має деяку швидкість і це потрібно врахувати при визначенні ударної сили.

В середині силосу окремі зернівки зернового вантажу рухаються до низу рівно прискорено. Час за який окремо взята зернівка пройде силосну висоту і удариться об його дно [98], визначається за формулою:

$$t = (-v_n + \sqrt{v_n^2 + 2 \cdot g \cdot H_c})/g, \quad (3.50)$$

де v_n – початкова швидкість зернівки після її сходження із транспортера у завантажувальний отвір силосу;

H_c – внутрішня висота силосу (висота падіння зернівки).

Швидкість рівноприскореного руху в момент точкового удару зернівки із основою силосу визначається за відомою формулою:

$$v_{уд} = v_n + gt. \quad (3.51)$$

Підставивши (3.50) в (3.51) отримаємо дійсну швидкість удару, котра не враховує час падіння зернівки

$$v_{уд} = \sqrt{v_n^2 + 2gH_c} \quad (3.52)$$

Теоретичні дослідження ударної взаємодії падаючого зерна на жорстку бетонну основу силосу проводились із використанням теореми про кількість руху матеріальної точки. згідно якої швидкість зернівки надає не сила, а імпульс сили [99]. В свою чергу швидкість залежить не тільки від імпульсу сил, але і від маси і висоти падіння.

Так як бетонне дно силосу не є гладкою горизонтальною поверхнею, а жорсткою поверхнею із невеликими впадинами і виступами то удар зернівки необхідно прийняти косим. При розгляді косоного удару зернівки об жорстку поверхню використовується гіпотеза Рауза [93].

3.6.2. Визначення ударної взаємодії зернівки пшениці об жорстку основу силосу

На рис.3.8 наведена розрахункова схема косого удару зернівки озимої пшениці, яка падає на жорстку пологоповерхню бетонної основи силосу.

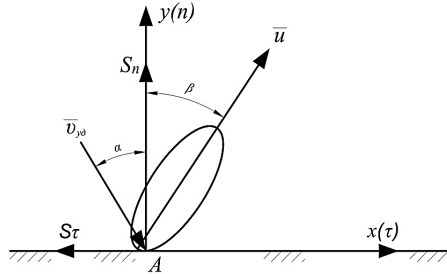


Рисунок 3.8 – Схема взаємодії падаючого зерна озимої пшениці із нерухомою жорсткою поверхнею

У відповідності до наведеної схеми швидкість зернівки на початку удару буде $v_{уд}$ (формула 3.52), а в кінці удару u . Даний елементарний часовий проміжок, розділений на два етапи.

Перший етап характеризується зміною форми і стану тіла, що ударяється. При цьому нормальна складова швидкості $v_{уд}^n$ змінюється від максимального значення до нуля. Час протікання цієї стадії удару позначимо через t_1 . На цій стадії в точці А відбудеться місцева деформація. Величина деформації залежить від швидкості падіння зернівки і внутрішньої висоти силосу. Чим більша швидкість і висота – тим значніші наслідки травмування зерна в наслідок удару його із жорсткою бетонною поверхнею [98,100].

На другому етапі відбувається відновлення початкової форми зернівки за рахунок її пружно-пластичної властивості. Початкові форми зернівки відновлюються якщо вона не була ушкоджена на першій стадії деформації. Час, який витрачається на відновлення початкової форми зернівки позначимо через t_2 . На цьому етапі нормальна складова швидкості відскоку зростає від нульового до кінцевого значення.

Розглянувши систему координат AXY , початок якої знаходиться в точці A – контактна взаємодія зернівки із бетонною основою силосу. Визначимо вектори швидкості зернівки, скориставшись ортамиліт.

Швидкість в момент удару t :

$$\bar{v}_{уд} = v_t \bar{t} + v_n \bar{n}.$$

Швидкість в кінці деформації зернівки, $u_n = 0$ в момент $t + t_1$:

$$\bar{u} = u_t \bar{t}.$$

Швидкість в кінці удару, в момент $t + t_1 + t_2$:

$$\bar{u}_{від} = u_t \bar{t} + u_n \bar{n}.$$

Кожному із вказаних вище етапів відповідає свій ударний імпульс. Протягом t_1 відбувається ударний імпульс деформації S_1 зернівки і вектор його направлений по осі AY (по нормалі n) вертикально у верх. За час t_2 відбувається ударний імпульс відновлення S_2 , який також направлений по нормалі до основи силосу.

Сумарний векторний імпульс удару зернівки об бетонну основу силосу буде:

$$\bar{S}_{сум} = \bar{S}_1 + \bar{S}_2. \quad (3.53)$$

Скориставшись другим законом Ньютона в імпульсній формі, який вказує на те, що зміна сумарного імпульсу тіла дорівнює імпульсу [101] діючої на нього сили. Тоді:

$$S_{сум} = \int_0^{H_c} F_{уд} dt = F_{уд} \cdot t_{уд}, \quad (3.54)$$

де $t_{уд}$ – миттєвий час удару зернівки об бетонне дно силосу.

З другого боку:

$$S_{сум} = m_n(u - v_{уд}) \quad (3.55)$$

Підставивши (3.55) в (3.54) і зробивши деякі перетворення визначимо максимальну силу контактної взаємодії зернівки з бетонною основою силосу при косому ударі:

$$F_{уд} = \frac{m_n(u - v_{уд})}{t_{уд}} = \frac{S_{сум}}{t_{уд}}. \quad (3.56)$$

Визначимо миттєвий час удару, який складається часу деформації тіла і часу його відновлення. Цей час досить малий, але він характеризує ударну взаємодію стичних тіл. В нашій задачі його можна визначити скориставшись хвильовими процесами. Відомо, що під час удару зерна об нерухому бетонну основу силосу виникає звукова ударна хвиля v_{XB} . Скориставшись геометричними характеристиками зерна озимої пшениці та тривалістю розповсюдженню звукової хвилі в бетоні визначаємо миттєвий ударний час:

$$t_{уд} = \frac{d_{ум}}{2v_{XB}} = \frac{k_{\phi}(a \cdot b \cdot c)^{1/3}}{2v_{XB}}, \quad (3.57)$$

де $d_{ум} = k_{\phi} \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}$ – умовний діаметр зернівки озимої пшениці;

k_{ϕ} – коефіцієнт, котрий враховує форму зернівки (для зерна пшениці $k_{\phi} = 1$ [95]),

a, b, c – відповідно, довжина, ширина і товщина насіння зерна озимої пшениці в м.

В середньому для пшениці умовний діаметр становить близько 3,0...4,5 мм, залежно від сорту та вологості зерна.

Коефіцієнт k_{ϕ} враховує реальну геометричну форму насіння пшениці відповідно до ідеального кулеподібного тіла.

В реальних умовах ударний імпульс невідомий ні по величині ні по напрямку дії. Для визначення максимальної ударної сили зернівки масою m_n об бетонну основу силосу скористаємось відомою гіпотезою Рауса [93]. Згідно з цією гіпотезою дотична і нормальна складові ударних імпульсів зв'язані між собою коефіцієнтом ударного тертя ковзання, тобто:

$$S_{\tau} = f_d S_n, \text{ або } S_x = f_d S_y, \quad (3.58)$$

де f_d – коефіцієнт ударного тертя ковзання, визначається експериментальним шляхом.

Спроєкуємо швидкості $\vartheta_{уд}$ і u на координатні осі AX і AY .

На вісь AX $\vartheta_{уд}^x = \vartheta_{уд} \sin \alpha$; $u^x = u \cdot \sin \beta$.

На вісь AY $\vartheta_{уд}^y = \vartheta_{уд} \cos \alpha$; $u^y = u \cos \beta$.

Скориставшись формулою (3.55) визначимо ударні імпульси по відповідним координатним осям. Ударні імпульси по осям $AХ$ і AV будуть:

$$\begin{cases} m_n(u^x - \vartheta_{уд}^x) = -S_x \\ m_n(u^y + \vartheta_{уд}^y) = +S_y \end{cases} \quad (3.59)$$

Коефіцієнт відновлення при косому ударі зернівки об бетонну основу подамо так:

$$K_B = \frac{u_{уд}^y}{\vartheta_{уд}^y} \quad (3.60)$$

Тоді ударний імпульс по осі AV з урахуванням (3.60) буде:

$$S_y = m_n \vartheta_{уд}^y (1 + K_B). \quad (3.61)$$

Або

$$S_y = m_n \vartheta_{уд} (1 + K_B) \cos \alpha. \quad (3.62)$$

Ударний імпульс по осі $AХ$ з використанням (3.58) буде:

$$S_x = f_d S_y = m_n \vartheta_{уд} f_d (1 + K_B) \cos \alpha \quad (3.63)$$

Сумарний ударний імпульс під час зіткнення зернівки об бетонне дно силосу можна представити так:

$$S_{сум} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} = m_n \vartheta_{уд} (1 + K_B) \cos \alpha \sqrt{1 + f_d^2} \quad (3.64)$$

Підставивши (3.52), (3.57) і (3.64) в (3.56) отримаємо залежність для визначення ударної сили зернівки об бетонне дно силосу при її косому ударі

$$F_{уд} = \frac{m_n \sqrt{\vartheta_n^2 + 2gH_c} v_{хв} (1 + K_B) \cos \alpha \sqrt{1 + f_d^2}}{2K_\phi \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}}. \quad (3.65)$$

При контактній взаємодії зернини озимої пшениці, під кутом α до нормалі, з жорстким бетонним дном силосу в зернині виникають внутрішні напруги, які приводять до її травмування.

3.6.3. Обчислення величини ударної сили

Для проведення розрахунків вибрані наступні усереднені дані для зерна озимої пшениці та силосу котрий змонтований на бетонній основі. Постійні величини розрахунку: $m_n = 4 \cdot 10^{-5}$ кг; $\vartheta_n = 0,68$ м/с; $H_c = 26,27$ м; $v_{хв} = 4000$ м/с;

$a = 7\text{мм}$; $b = 2,5\text{мм}$; $c = 3\text{мм}$; $g = 9,81\text{м/с}^2$. Провівши розрахунки по визначенню ударної сили при фіксованих величинах $\alpha = 20^\circ$ і $K_b = 0,41$, встановлено, що ударна сила є функцією коефіцієнта ударного тертя ковзання ($F_{\text{уд}} = \varphi(f_d)$). Підставляючи постійні усереднені дані, та фіксовані величини при змінному ударному коефіцієнті тертя ковзання у формулу 3.65, були отримані значення ударної сили при падінні зернини на дно силосу. Ця функціональна залежність представлена на рис.3.9.

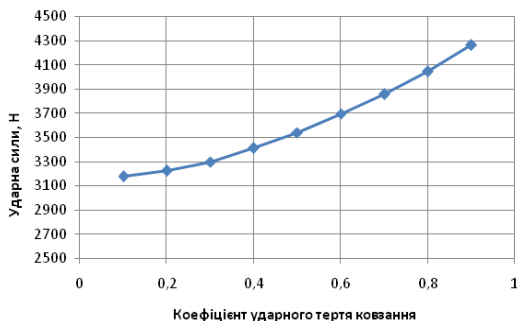


Рисунок 3.9 – Залежність ударної сили зернини озимої пшениці об бетонне дно силосу від ударного коефіцієнта тертя ковзання при $\alpha = 20^\circ$ і $K_b = 0,41$.

Із приведеного графіка видно, що ударна сила залежить від ударного коефіцієнта терті. При збільшенні f_d ударна сила збільшується. Це відбувається внаслідок більш тривалої взаємодії зернини із бетонним дном силосу, яке визивається тертям ковзання.

При косому ударі зернини озимої пшениці об бетонне дно силосу нормальна і дотична складові ударних імпульсів зв'язані між собою коефіцієнтом ударного тертя ковзання. Величина ударної сили залежить від швидкості і висоти падіння зернини, а також від фізико-механічних властивостей бетонного дна силосу та геометричних розмірів зернини.

3.7.Компресійне ушкодження зерна в силосах

Завантаження циліндричних ємностей (типу силос) відбувається шляхом вільного падіння зернового вантажу з досить великої висоти. На характер руху зерна всередині ємності впливає форма зерна, що завантажується та його шорсткість. При падінні зерна в ємність утворюється конусоподібний насип (рис.3.10).

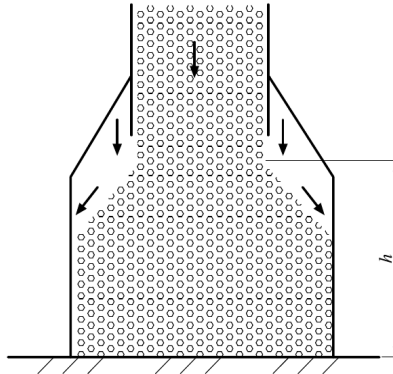


Рисунок 3.10– Схема завантаження силосу зерном

По мірі надходження зернового вантажу в ємність висота насипу (h) збільшується. В утвореному зерновому насипі виникають динамічні сили, які призводить до компресійного ушкодження зерна. Крім того зерновий вантаж тисне на основу силосу і одночасно на його циліндричну оболонку. Дія статичного тиску на основу силосу описана в роботах [102,103], а розподілення напруг які виникають в силосахв роботі [104].

Статичний тиск, як правило характерний нижнім шарам зернового насипу. Величина динамічної сили визначається:

$$F_g = q \cdot v_{\kappa} = q \cdot \sqrt{\frac{2mg}{c_x \cdot \rho_n \cdot S}}, \quad (3.66)$$

де q – подача зернового матеріалу;

v_{κ} – швидкість зерна в момент його дотику із зерновим насипом;

ρ_n – щільність повітряного середовища в силосі;

C_x – безрозмірний коефіцієнт опору, залежить від форми зернового вантажу;

S – меделева площа зерна;

m – маса зерна.

Під дією динамічної сили зерновий насип ущільнюється. По мірі заповнення ємності зерном динамічні (компресійні) сили зростають. Після завершення завантаження ємності зерном динамічні сили дещо стабілізуються і це призводить до подальшого ушкодження зерна та його злежування. Відомо, що злежування негативно впливає на стабільність випуску зернового вантажу із ємності.

Сипкий зерновий вантаж який завантажується у циліндричну ємність є двофазною дисперсною системою. Ця система характеризується об'ємною масою, щільністю твердої частини зернового вантажу та коефіцієнтом ущільнення. Як відомо величина K_y залежить від умов формування зернового насипу в середині циліндричної ємності. В табл. 2.1 наведені значення коефіцієнта ущільнення для основних сільськогосподарських культур [90].

Коефіцієнт ущільнення залежить від висоти шару зернового насипу і його можна визначити за формулою:

$$K_y = a \cdot K_{\max} \left[1 - e^{-(b - ch_t)} \right], \quad (3.67)$$

де a, b, c – постійні коефіцієнти (для пшениці $a=1; b=1,6; c=0,332$);

h_t – висота шару зерна в насипу.

Явище злежування, це зчеплення окремих частинок зерна у зерновому насипі. При нерівномірному завантаженні ємності зерном динамічні навантаження прискорюють процес злежування, що негативно впливає на якісні показники зерна.

Ущільнення зернового насипу в ємності супроводжується тертям окремих зернин одна з одною. При цьому виникає теплова енергія, яка розсіюється в середині ємності.

Під час гравітаційного завантаження ємностей зерном компактним струменем відбувається сегрегація зернового вантажу і воно продовжується і на самому зерновому насипу. Тобто відбувається розділення зернового потоку на легкі і важкі частинки. Сегрегація веде до збільшення компресійного ушкодження зерна, особливо в місцях де накопичуються більш важкі частинки зернового вантажу.

Розглянемо динаміку розподілення навантажень у повністю завантажених ємності зерном (рис.3.11). Для цього в довільному місці виділяємо елементарний зерновий об'єм висотою dh . На виділений елементарний об'єм діють: сила ваги G , тиск зернового вантажу P , що знаходиться вище виділеного елементарного об'єму; реакція $R_i = (p + dp)$ нижнього шару зерна і реакція з боку стіни ємності R_c .

Якщо виділений елементарний об'єм знаходиться в статичній рівновазі, то сума всіх сил, які діють на виділений об'єм дорівнює нулю.

$$G + p_s + R_i \cdot S + R_c = 0, \quad (3.68)$$

де $G = s \cdot dh \cdot \rho_e \cdot g$ – вага виділеного зернового елементарного об'єму;

S – площа виділеного зернового шару;

$$R_c = p \cdot \varepsilon \cdot L \cdot dh.$$

Після підстановки фізико-механічних показників зернового вантажу формула (3.68) набуває такого вигляду:

$$\frac{\gamma}{K_y} \cdot S \cdot g \cdot dh + PS - (p + ds)S - P\varepsilon \cdot L \cdot dh = 0, \quad (3.69)$$

де γ – об'ємна маса виділеного об'єму зерна;

K_y – коефіцієнт ущільнення зернового насипу;

$\varepsilon = \xi_b \cdot f_T$ – комплексний коефіцієнт;

L – довжина кола виділеного зернового шару;

ξ_b – коефіцієнт бокового тиску;

f_T – коефіцієнт тертя.

Після спрощення рівняння (3.69) набуває наступний вигляд:

$$\frac{dp}{dh} = \left(1 - \frac{P \cdot \varepsilon \cdot K_y}{R_r \cdot \gamma \cdot g} \right) \gamma \cdot g, \quad (3.70)$$

де $R_r = \frac{S}{L}$ гідравлічний радіус поперечного перерізу ємності.

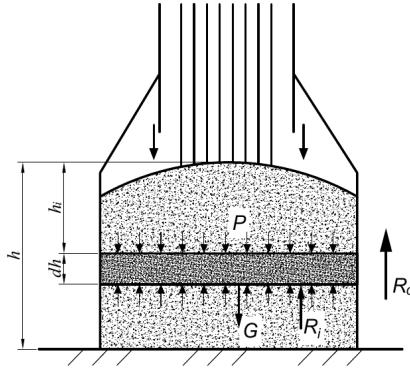


Рисунок 3.11– Динаміка розподілення статичних навантажень в силосі

Для спрощеного рішення рівняння (3.70) введені наступні позначення:

$$b = \frac{\varepsilon \cdot K_y}{R_r \cdot \gamma \cdot g}; a = \frac{\gamma \cdot g}{K_y} \quad (3.71)$$

Рівняння (3.70) з урахуванням прийнятих позначень (3.71) буде мати наступний вигляд:

$$\frac{dp}{dh} = (1 - p \cdot b) \cdot a,$$

виконавши розділення змінних рівняння інтегрується.

$$\frac{dp}{(1 - p \cdot b)} = a \cdot dh. \quad (3.72)$$

Проінтегрувавши отриманий вираз будемо мати:

$$p \cdot b = 1 - e^{-b(a \cdot h + c)}$$

Припустимо, що на поверхні виділеного елементарного об'єму ($h=0$) сили тиску відсутні $p=0$, тоді

$$p = \frac{1 - e^{-a \cdot b \cdot h}}{b}. \quad (3.73)$$

Після підстановки (3.71) в (3.73) отримаємо залежність для визначення тиску зернового вантажу, який знаходиться у циліндричній ємності силосу;

$$p = \frac{\left(1 - e^{-\frac{\varepsilon \cdot h}{R_r}}\right) R_r \cdot \gamma \cdot g}{\varepsilon \cdot K_y}. \quad (3.74)$$

Розглянемо силос для зберігання сухого зерна моделі 2215/15 виробництва компанії Sumaga S.A. Він являє собою сталеву ємність циліндричної форми, яка встановлюється на плоску бетонну основу. Діаметр силосу 22,15 м, висота становить 17,1 м.

При зберіганні в цьому силосі сухого зерна кукурудзи, яка має наступні характеристики: питома вага $\gamma=800\text{кг/м}^3$, кут внутрішнього тертя $\varphi=25^\circ$, коефіцієнт тертя по металу $f=0,4$.

Коефіцієнт бокового тиску становить

$$\xi_{\phi} = \text{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) = \text{tg}^2\left(45^\circ - \frac{25^\circ}{2}\right) = 0,406.$$

Гідравлічний радіус поперечного перерізу силосу

$$R_r = \frac{S}{L} = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot \pi \cdot d} = \frac{22,15}{4} = 5,54 \text{ м.}$$

Стінки силосу виробництва компанії Sumaga S.A. виконані із хвилястого профілю, тому коефіцієнт тертя необхідно взяти не як зерна по металу, а як зерна кукурудзи по зерну кукурудзи. Отже коефіцієнт тертя зерна по зерну кукурудзи становить

$$f = \text{tg} 25^\circ = 0,47.$$

Підставивши основні параметри зерна кукурудзи і геометричні параметри силосу в формулу (3.58) отримаємо:

для зерна кукурудзи

$$p_k = 387,1 \cdot (1 - e^{-0,035 \cdot h}),$$

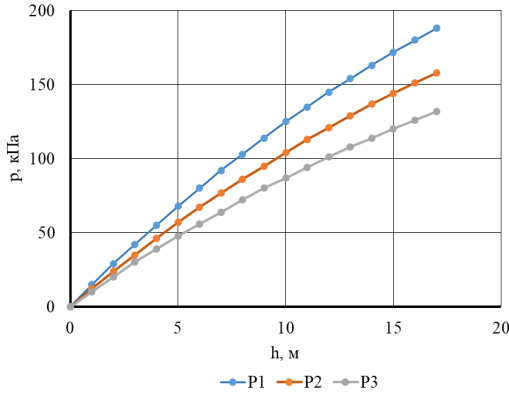
для зерна пшениці

$$p_n = 367,5 \cdot (1 - e^{-0,035 \cdot h}),$$

для зерна ячменю

$$p_n = 313,9 \cdot (1 - e^{-0,035 \cdot h}).$$

На рис. 3.12 приведений графік зміни тиску зернового вантажу кукурудзи, пшениці і ячменю в силосі виробництва компанії Symaga S.A. в залежності від висоти укладання.



P1 – кукурудза; P2 – пшениця; P3 – ячмінь.

Рисунок. 3.12 – Залежність зміни тиску від висоти завантаження ємності зерновим вантажем в силосі компанії Symaga S.A.

З графіка видно, що тиск насипного зерна змінюється по всій висоті силосу по логарифмічній кривій. Для зменшення цього навантаження необхідно, щоб співвідношення висоти силосу до його діаметру були в межах $0,65 < h/d < 1,6$, де h – висота циліндричної частини силосу, а d – діаметр силосу.

Всі металеві силоси в залежності від навантаження на днище поділяються на три групи. Для першої групи силосів навантаження на днище не повинне перевищувати 120 кПа [105]. Це характерно для невеликих силосів з діаметром 11...16 м та з висотою 11...18,7 м, тобто співвідношення $h/d = 0,75...1,6$.

До другої групи – відносяться силиси у яких силове навантаження на днище знаходиться в межах від 120 до 160 кПа, а до третьої групи силиси у яких силове навантаження на днище вище 160 кПа.

Співвідношення висоти силосу до його діаметру має суттєвий вплив на перерозподіл навантажень від зерна на стінки та на днище металевих силосів виготовлених із гофрованих панелей. На рис.3.13 наведені геометричні параметри металевого силосу та навантаження котрі діють на днище при повному завантаженні силосу зерновим матеріалом. Вертикальний тиск на пласке бетонне дно визначається за формулою [105]:

$$P_{\text{заг}} = P_1 + \Delta P_2 \left(\frac{2,0 - h_c/d_c}{2,0 - h_{\text{НС}}/d_c} \right), \quad (3.75)$$

де ΔP_2 – різниця між вертикальними тисками, визначеними за двома методами, для бункера малої гнучкості;

P_1 – вертикальний тиск на рівні основи бункера малої гнучкості;

$h_{\text{НС}}$ – загальна висота насипного конуса на поверхні сипкого матеріалу;

h_c – висота вертикального ствола бункера від перехідного вузла до еквівалентної поверхні сипкого матеріалу;

d_c – внутрішній діаметр силосу.

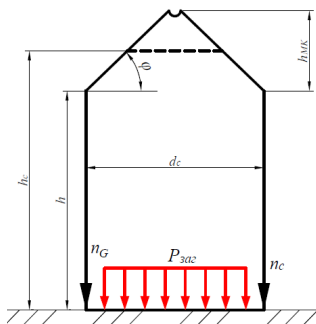


Рисунок 3.13 – Геометричні параметри силосу та навантаження, що діють на днище силосу.

Для зменшення компресійного ушкодження зерна в нижніх шарах насипі та інших небажаних явищ використовуються спеціальні пристрої, огляд яких

наведений в другому розділі роботи. Розглянуті технічні засоби для ощадного завантаження ємностей зерном дають можливість рівномірно розподіляти зерновий вантаж по всій площі ємності, що в свою чергу веде до зменшення компресійного ушкодження зерна.

РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОБЕРЕЖНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ СИЛОСІВ ЗЕРНОМ

4.1. Загальні положення про гравітаційний рух при заповненні силосів зерновим матеріалом

Сучасні силосні споруди як правило заповнюються зерновим матеріалом компактним струменем, при цьому в нижніх шарах зернового насипу накопичується певний відсоток травмованого зерна. Таке зерно інтенсивно осідає, що в свою чергу приводить до ущільнення зернового матеріалу, та його стиснення. В роботах [21,24,93,106-112] наведений узагальнений матеріал, який на даний час накопичений по питанню швидких гравітаційних потоків зернових матеріалів у лотках таканалах різної конструкції, похилих площинах та ін. Як вказується у вище згаданих роботах гравітаційні потоки зернових матеріалів супроводжуються ефектами сегрегації та можливими травмуваннями зернівок. При завантаженні силосів компактним струменем спостерігається сегрегація зернового насипу [120]. Вона суттєво впливає на динаміку руху зернового вантажу.

Проведений літературний аналіз вказує на те, що теоретичними питаннями пов'язаними із гравітаційним рухом зернового матеріалу по різних робочих органах займалися як вітчизняні так і закордонні вчені [113-119]. В даних роботах вказується на те, що принципіальною особливістю швидких гравітаційних потоків є хаотичне переміщення зернового матеріалу із значною лінійною швидкістю. Такі потоки супроводжуються активною взаємодією частинок вантажу між собою і робочими органами, внаслідок чого можуть з'явитися такі побічні явища як перемішування і розділення, що негативно впливає увесь технологічний процес пов'язаний із завантаженням силосів зерном та його довготривале зберігання.

Як вказувалось раніше для зменшення швидкості доставки зернової маси на дно силосів, без його ушкодження, необхідно використовувати спеціальні пристрої. Так в роботах [50,51,55] для зменшення швидкості гравітаційного падіння зернового вантажу під завантажувальним отвором силосу необхідно встановити гравітаційний розподільник, зерновий вантаж попавши на бокову поверхню цього пристрою змінює гравітаційну вертикальну швидкість на швидкість під кутом до горизонту. В результаті такої зміни швидкостей зерновий матеріал менше травмується і зменшується динамічне ущільнення зернового насипу.

При завантаженні силосів з використанням вертикальних гвинтових конвеєрів зерновий вантаж здійснює гвинтовий рух. В роботах [3,24,74,78] проведені теоретичні дослідження руху зернівок за допомогою гравітації по гвинтовій поверхні. Такий рух дає можливість зменшити швидкість доставки зернового матеріалу в середину силосу. Недоліком такого способу завантаження являється наявність в середині порожнини ємності громіздкої каскадної споруди.

Для усунення цього недоліку необхідно всередині силосу встановити периферійний відкритий гвинтовий канал (ПВГК) із змінними кутами нахилу до горизонту. Будова і принцип його роботи цього пристрою описані в другому розділі цієї роботи.

4.2. Математичне моделювання руху зерна в спіральному гвинтовому каналі

4.2.1 Обґрунтування руху зернового матеріалу у відкритому гвинтовому каналі

Для зменшення травмування зерна можна використати периферійний відкритий гвинтовий завантажувальний пристрій (ПВГК) зі змінними кутами спуску (рис. 2.21). Завантажувальний пристрій складається із розгінної і гвинтової гальмівної ділянок, які встановлюються під різним кутом до горизонту. ПВГК кріпиться на внутрішній частині силосу з можливістю регулювання кутів спуску. По мірі заповнення силосу зерном засипається у

відкритий гвинтовий канал.

На початку свого руху по гвинтовій поверхні зерновий потік має певну потенціальну енергію, котра під дією гравітаційної сили перетворюється в кінетичну енергію, а невелика її частина витрачається на нагрів робочої поверхні гвинтового каналу. В подальшому теплова енергія, розсіюється в середині силосу. Більша частина кінетичної енергії рухомого зернового потоку іде на завантаження силосу зерном.

Для нормального руху зернового потоку по жолобу гвинтової поверхні кут α у верхній частині ПВГК повинен бути більшим від кута природного відкосу ξ [78]. Така умова забезпечує утворення сталого зернового потоку по робочій поверхні гвинтового каналу. Пройшовши першу ділянку гвинтового каналу з кроком h_1 , швидкість зернового потоку зменшується за рахунок зменшення кута α . По досягненні кінцевої ділянки спуску зерновий потік плавно висипається у нижню частину ємності, заповнюючи рівномірно увесь його об'єм. При цьому швидкість сходу зерна з гальмівного каналу повною мірою зменшена, за рахунок зменшення кута спуску від α_{\max} до α_{\min} . Плавне зменшення кута спуску запобігає виникненню критичних значень ударних сил зерна об стінки та днище ємності, що в свою чергу зменшує вірогідність механічного травмування зерна. По мірі заповнення силосу зерном, засипається і гвинтовий канал.

Використання в циліндричних ємностях для зберігання зерна гвинтового каналу сприяє створенню на протязі всього руху зернового потоку необхідного для виконання технологічного процесу градієнта швидкості. Створений даним пристроєм градієнт швидкості забезпечує безперешкодний та швидкий рух зернового потоку у верхній частині гвинтового каналу, та сповільнення його у нижніх частинах пристрою. Така конструкція робочого органу мінімізує деформаційні руйнування зерна та значно зменшує рівень травмування зерна. Для опису процесу руху зернового потоку по відкритому гвинтовому каналу з урахуванням взаємодії зерна з матеріалом з якого виготовлений жолоб

гвинтового каналу складемо систему сил які діють на елементарний об'єм зернового матеріалу.

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

Силосні ємності, як правило, завантажуються зерновим матеріалом гравітаційним методом. Тобто зерновий матеріал транспортерами подається до горловини силосу і скидається вниз ємності. Падаюче зерно, особливо в початковий період завантаження, вдаряється об бетонне дно споруди і пошкоджується. В результаті чого в нижній частині силосу накопичується травмоване зерно.

Для усунення цього недоліку можна використати спіральний гвинтовий пристрій з різними кутами спуску. Спіральний гвинтовий завантажувальний пристрій має декілька різних гвинтових ділянок. Перша гвинтова ділянка – розгінна з кутом α_1 до горизонту. Наступні ділянки гальмівні з кутами меншими за α_1 . Якщо пристрій складається із двох гальмівних ділянок, а це залежить від висоти силосу, то $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$ [78].

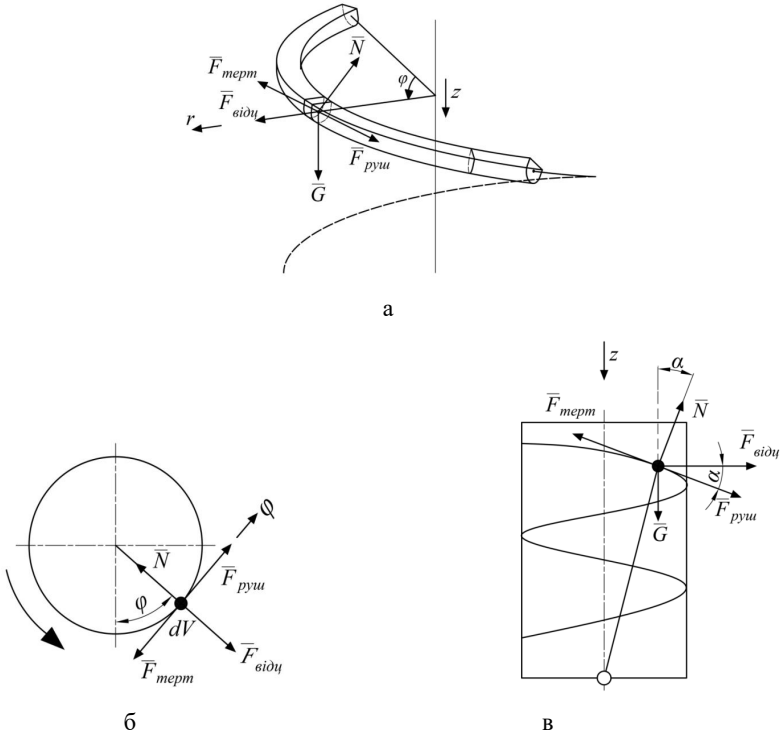
Спіральний гвинтовий завантажувальний пристрій кріпиться на внутрішній частині циліндричній частині силосу. Він виготовляється із U – подібного профілю, відкрита частина якого направлена вгору, і має розгінну та гальмівну ділянки із відповідними змінними кутами нахилу.

Під час руху зернового матеріалу у спіральному гвинтовому каналі на елементарний об'єм зерна діє певна система сил. В зв'язку з цим була створена математична модель сил, які діють на елементарний об'єм зернового потоку у гвинтовому каналі з використанням циліндричної системи координат (рис. 4.1).

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

$$F_{руш} = \sum F_k \text{ або } m\vec{a} = \sum \vec{F}_k, \quad (4.1)$$

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



а – у просторовому відображенні; б – у горизонтальному відображенні;
в – у вертикальному відображенні

Рисунок 4.1 – Система сил, діючих на елементарний об’єм зернового потоку у гвинтовому каналі, в циліндричній системі координат

Із врахуванням обертально-поступального характеру руху зерна у гвинтовому каналі баланс сил у векторній формі буде мати наступний вигляд [78]:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{мерт} + \vec{F}_{відц} + \vec{N} + \vec{G}, \quad (4.2)$$

де $\vec{F}_{терм}$ – сила тертя зернового потоку об поверхню гвинтового каналу;

$\vec{F}_{відц}$ – відцентрова сила, що діє на зерновий потік при обертальному русі зернового потоку навколо центральної осі гвинтового каналу;

\vec{N} – сила нормальної реакції поверхні гвинтового каналу; \vec{G} – сила гравітаційного тяжіння.

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

$$\begin{cases} ma_r = F_{відц}^r - N^r, \\ ma_\varphi = -F_{терм}^\varphi + N^\varphi, \\ ma_z = -F_{терм}^z - N^z + G^z, \end{cases} \quad (4.3)$$

де a_r , a_φ , a_z – проекції прискорення зернової маси m за радіальним, кутовим та висотним напрямком циліндричної системи координат;

$F_{відц}^r$, N^r – проекції відцентрової сили та нормальної сили реакції опори за радіальним напрямком;

$F_{терм}^\varphi$, N^φ – проекції сили тертя та нормальної сили реакції опори за кутовим напрямком;

$F_{терм}^z$, N^z , G^z – проекції сили тертя, нормальної сили реакції опори та сили гравітаційного тяжіння за висотним напрямком.

4.2.3 Обґрунтування теоретичної моделі швидкості руху зерна у відкритому гвинтовому каналі

Проекції вектору прискорення \vec{a} у системі (4.3) за кожним із напрямків циліндричної системи координат, з урахуванням відсутності руху зернової маси у радіальному напрямку, визначається із виразів:

$$\begin{cases} a_r = 0, \\ a_\varphi = r \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt}, \\ a_z = \frac{d^2z}{dt^2}. \end{cases} \quad (4.4)$$

Так як переміщення зернової маси у радіальному напрямку відсутнє, то координата r приймає стале значення, а складова $\frac{dr}{dt}$ у системі рівнянь (4.4) нівелюється і дана система приймає наступний вигляд:

$$\begin{cases} a_r = 0, \\ a_\varphi = r \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \\ a_z = \frac{d^2z}{dt^2}. \end{cases} \quad (4.5)$$

Беручи до уваги нульове радіальне прискорення $a_r=0$, система рівнянь (4.3) спрощується:

$$\begin{cases} F_{\text{відц}}^r = N^r, \\ m a_\varphi = -F_{\text{терт}}^\varphi + N^\varphi, \\ m v_z = -F_{\text{терт}}^z - N^z + G^z. \end{cases} \quad (4.6)$$

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

$$F_{\text{відц}}^r = m r \omega^2, \quad (4.7)$$

де r – відстань від осі гвинтового каналу до центру ваги зернової маси;

ω – кутова швидкість обертання зернової маси.

Сила тертя $F_{\text{терт}}$:

$$F_{\text{терт}} = \mu \cdot N, \quad (4.8)$$

де μ – коефіцієнт тертя зерна об поверхню гвинтового каналу;

N – сила нормальної реакції опори.

З урахуванням залежностей (4.7) та (4.8) система рівнянь (4.6) приймає

наступний вигляд:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ ma_\varphi = -\mu N^\phi \cos \alpha + N^\phi, \\ ma_z = -\mu N^z \sin \alpha - N^z + mg. \end{cases} \quad (4.9)$$

Після виділення спільних множників та їх групування система (4.9) набуде наступний вигляд:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ ma_\varphi = N^\varphi (1 - \mu \cos \alpha), \\ mv_z = mg - N^z (1 + \mu \sin \alpha). \end{cases} \quad (4.10)$$

Проекції сили нормальної реакції опори N_φ та N_z можуть бути знайдені шляхом їхнього проектування на напрямок дії сили гравітаційного тяжіння (рис. 4.1):

$$\begin{cases} N_\varphi = G \sin \alpha, \\ N_z = G \cos \alpha, \end{cases} \text{ або } \begin{cases} N_\varphi = mg \sin \alpha, \\ N_z = mg \cos \alpha, \end{cases} \quad (4.11)$$

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

З урахуванням виразів (4.11), система (4.10) набуває наступний вигляд:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ ma_\varphi = (1 - \mu \cos \alpha) \cdot mg \cdot \sin \alpha, \\ ma_z = mg - (1 + \mu \sin \alpha) \cdot mg \cdot \cos \alpha. \end{cases} \quad (4.12)$$

Після скорочень та тригонометричних перетворень маємо:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ a_\varphi = g \cdot (\sin \alpha - 0.5 \cdot \mu \sin 2\alpha), \\ a_z = g(1 - \cos \alpha - 0.5\mu \sin 2\alpha). \end{cases} \quad (4.13)$$

Проводячи заміну проекцій прискорень a_φ та a_z їх виразами з системи рівнянь (4.5), система (4.13) формується таким чином:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ r \frac{d^2\varphi}{dt^2} = g(\sin\alpha - 0.5 \cdot \mu \sin 2\alpha), \\ \frac{d^2z}{dt^2} = g(1 - \cos\alpha - 0.5\mu \sin 2\alpha). \end{cases} \quad (4.14)$$

Провівши наступну заміну:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{r} g(\sin\alpha - 0.5 \cdot \mu \sin 2\alpha), \\ K_2 &= g(1 - \cos\alpha - 0.5\mu \sin 2\alpha). \end{aligned} \quad (4.15)$$

Тим самим система (4.13) приводиться до наступного вигляду:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ \frac{d^2\varphi}{dt^2} = K_1, \\ \frac{d^2z}{dt^2} = K_2. \end{cases} \quad (4.16)$$

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

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ \frac{d\varphi}{dt} = K_1 t + C_1, \\ \frac{dz}{dt} = K_2 t + C_3, \end{cases} \quad (4.17)$$

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ \varphi = 0.5 K_1 t^2 + C_1 t + C_2, \\ z = 0.5 K_2 t^2 + C_3 t + C_4. \end{cases} \quad (4.18)$$

Отримані сталі інтегрування C_1, C_2, C_3, C_4 визначаються з урахуванням відповідних граничних умов.

Загальний пройдений шлях зерновою масою по гвинтовому каналу, з урахуванням характеру зміни координат φ та z відповідно до системи рівнянь (4.18), визначається із виразу:

$$l = \sqrt{(r \cdot \varphi)^2 + z^2}. \quad (4.19)$$

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

$$V = \frac{r^2 \varphi(t) \frac{d}{dt} \varphi(t) + z(t) \frac{d}{dt} z(t)}{\sqrt{r^2 (\varphi(t))^2 + (z(t))^2}}. \quad (4.20)$$

Якщо гвинтовий пристрій має єдиний кут нахилу спіралі α , то канал не має гальмівної ділянки і зернова маса постійно збільшує свою швидкість. Тобто відповідно до (4.20) маємо швидкість руху зерна тільки для розгінної ділянки:

$$V = \frac{r^2 \varphi^p(t) \frac{d}{dt} \varphi^p(t) + z^p(t) \frac{d}{dt} z^p(t)}{\sqrt{r^2 (\varphi^p(t))^2 + (z^p(t))^2}}. \quad (4.21)$$

Для запобігання травмування зерна необхідно, щоб швидкість руху маси зерна при його завантаженні в силос істотно не зростала. Для цього наведену теоретичну гвинтову установку (рис. 4.1) доцільно удосконалити і умовно розділити її на розгінну та гальмівну ділянки, з довжинами спіралей $l_{p\alpha}$ l_{β} і кутами їх нахилу до горизонту α та β відповідно. Тобто швидкість зерна наприкінці розгінної ділянки повинна буде максимальною V_{max} . При цьому остаточна швидкість зерна в кінці гальмівної ділянки повинна бути якомога меншою, але бути не меншою ніж стартова швидкість зернової маси на розгінній ділянці, $V_{noc} \leq V_{кин}$ [78]. Остання умова забезпечує проходження зерна без його згруження на будь-якій ділянці пристрою. Для проведення подальшого дослідження було прийнято, що ці швидкості рівні між собою $V_{noc} = V_{кин} = V_0$ [78].

Нехай V_0 – швидкість, яку зерно набуває під дією сили гравітації падаючи з отвору бункера, що розташований на висоті h_0 від краю каналу розгінної ділянки. В момент падіння зерна з воронки бункера на початок жолобу відбувається перехід його потенціальної енергії в кінетичну, в результаті чого зерно набуває швидкості V_0 . Згідно закону збереження енергії $mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2}$

[121]. Отже, початкова швидкість зерна:

$$V_0 = \sqrt{2gh_0}. \quad (4.22)$$

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

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

Для отримання формули, що визначає математичне співвідношення між кутами нахилу розгінної та гальмівної ділянки α і β , відповідно до умови $V_{поч} = V_{кін} = V_0$, були використані результатами попередніх досліджень [78], відповідно, для розгінної та гальмівної ділянок. Крім сили тертя, реакції опори та сили тяжіння також врахована відцентрова сила, яка діє на зерно з прискоренням $a = \frac{V^2}{r}$ під час його руху по гвинтовій лінії. Відповідно до закону збереження енергії створена систему рівнянь, що описує перетворення кінетичної та потенціальної енергії зернового потоку на розгінній та гальмівній ділянці циліндричної спіралі:

$$\begin{cases} mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2}, \\ \frac{mV_0^2}{2} + mgl_p \sin \alpha - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_p \cos \alpha = \frac{mV_{max}^2}{2}, \\ \frac{mV_{max}^2}{2} + mgl_r \sin \beta - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_r \cos \beta = \frac{mV_0^2}{2}. \end{cases} \quad (4.23)$$

Прирівнявши друге і третє рівняння системи (4.23) та спростивши вираз отримаємо:

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

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

$$l_p \sin \alpha - \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) l_p \cos \alpha + l_r \sin \beta - \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) l_r \cos \beta = 0. \quad (4.24)$$

Для спрощення подальшого розв'язку (4.24) прийнято, що довжини розгінної та гальмівної ділянки однакові, тобто $l_p = l_r$.

Тоді:

$$\sin \alpha - \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \alpha + \sin \beta - \mu \cos \beta = 0. \quad (4.25)$$

З рівняння (4.25) маємо:

$$\begin{aligned} \sin \alpha + \sin \beta &= \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \alpha + \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \beta, \\ \sin \frac{\alpha + \beta}{2} &= \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \frac{\alpha + \beta}{2}, \\ \beta &= 2 \arctg \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) - \alpha. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Для спрощення (4.26) прийнято, що швидкість руху зерна V , яка безпосередньо впливає на відцентрове прискорення, рівна V_0 . Тоді:

$$V = V_0 \rightarrow V^2 = V_0^2 = 2gh_0. \quad (4.27)$$

З (4.26) враховуючи (4.27) остаточно визначена залежність між кутами розгінної та гальмівної ділянки:

$$\beta = 2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha. \quad (4.28)$$

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

Враховуючи (4.28) та результати досліджень [78] також були визначені коефіцієнти для розгінної ділянки (4.15) та гальмівної частини спіралі з кутом нахилу β :

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

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

або

$$\begin{aligned} K_1^r &= \frac{1}{r} g \left(\sin \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) - 0.5 \cdot \mu \sin 2 \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) \right), \\ K_2^r &= g \left(1 - \cos \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) - 0.5 \mu \sin 2 \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) \right). \end{aligned} \quad (4.29)$$

З урахуванням (4.29) система (4.18) переписана для гальмівної ділянки у вигляді:

$$\begin{cases} N^r = m r \omega^2, \\ \varphi^r = 0.5 K_1^r t^2 + C_1 t + C_2, \\ z^r = 0.5 K_2^r t^2 + C_3 t + C_4. \end{cases} \quad (4.30)$$

Використавши систему рівнянь (4.30) та формулу (4.20) було отримано рівняння швидкості зернової маси для гальмівної ділянки гвинтового каналу:

$$v^r = \frac{r^2 \varphi^r(t) \frac{d}{dt} \varphi^r(t) + z^r(t) \frac{d}{dt} z^r(t)}{\sqrt{r^2 (\varphi^r(t))^2 + (z^r(t))^2}}. \quad (4.31)$$

Для подальшого розв'язку були враховані наступні факти:

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

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

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

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

Для цього визначена довжина витка та довжина розгінної ділянки l_p в

цілому:

$$S = \pi dtg\alpha = 2\pi r t g\alpha,$$

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

$$l_p = n_p l_0 = n_p 2\pi r \sqrt{1 + t g^2\alpha}. \quad (4.32)$$

З іншого боку, визначивши крок витка гвинтової спіралі отримаємо:

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

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

$$l_p = n_p l_0 = n_p \sqrt{4\pi^2 r^2 + \frac{h_p^2}{n_p^2}} = \sqrt{4\pi^2 r^2 n_p^2 + h_p^2}. \quad (4.33)$$

Знайшовши h_p , були прорівняні праві сторони рівнянь (4.32) і (4.33):

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

$$h_p = 2n_p \pi r t g\alpha.$$

Знаючи h_p був визначений час проходження зерна по розгінній ділянці t_p , для цього використане рівняння $z(t)$ системи (4.18), прорівнявши $z=h_p$:

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

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

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

$$t_p = \frac{-C_3 + \sqrt{C_3^2 - 2K_2(C_4 - 2n_p \pi r t g\alpha)}}{K_2}. \quad (4.34)$$

Довжина спіралі пристрою складається з однакових довжин розгінної та гальмівної ділянок. З (4.19) була визначена загальна довжина гвинтової спіралі, яка відповідає суміжним цих ділянок:

$$l = l_p + l_r = \sqrt{(r \cdot \varphi)^2 + z^2} = \frac{1}{2} \sqrt{(r \cdot \varphi^p)^2 + (z^p)^2} + \frac{1}{2} \sqrt{(r \cdot \varphi^r)^2 + (z^r)^2}. \quad (4.35)$$

Узагальнена формула швидкості переміщення $V = \frac{dl}{dt}$ зернового матеріалу

зручно представити так:

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

Враховуючи зменшення швидкості на гальмівній ділянці гвинтової спіралі отримаємо:

$$V = \frac{r^2 \varphi^p(t) \frac{d}{dt} \varphi^p(t) + z^p(t) \frac{d}{dt} z^p(t)}{2 \sqrt{r^2 (\varphi^p(t))^2 + (z^p(t))^2}} - \frac{r^2 \varphi^r(t) \frac{d}{dt} \varphi^r(t) + z^r(t) \frac{d}{dt} z^r(t)}{2 \sqrt{r^2 (\varphi^r(t))^2 + (z^r(t))^2}}. \quad (4.36)$$

Приймаючи рівність довжин розгінної та гальмівної ділянок $l_p = l_r$, аналогічно до (4.32)–(4.34) визначені кількість витків гальмівної ділянки n_r , час проходження зернового вантажу по цій ділянці t_r та час t_{max} :

$$n_r = \frac{l_p}{2\pi r \sqrt{1 + tg^2 \beta}}, \quad (4.37)$$

$$t_r = \frac{-C_3 + \sqrt{C_3^2 - 2K_2^r (C_4 - 2n_r \pi r tg \beta)}}{K_2^r}. \quad (4.38)$$

$$t_{max} = t_p + t_r. \quad (4.39)$$

Враховуючи співвідношення (4.18), (4.21), (4.22), (4.28)–(4.31), (4.34)–(4.39) остаточно була отримана модель швидкості руху зерна по гвинтовому каналу у вигляді системи рівнянь:

$$V = \begin{cases} \sqrt{2gh_0}, & \text{при } t = 0, \\ \frac{r^2 \varphi^p(t) \frac{d}{dt} \varphi^p(t) + z^p(t) \frac{d}{dt} z^p(t)}{2\sqrt{r^2 \varphi^p(t)^2 + (z^p(t))^2}}, & \text{при } t \in (0; t_p], \\ \frac{r^2 \varphi^p(t_p) \frac{d}{dt} \varphi^p(t_p) + z^p(t_p) \frac{d}{dt} z^p(t_p)}{2\sqrt{r^2 \varphi^p(t_p)^2 + (z^p(t_p))^2}} - \\ - \frac{r^2 \varphi^r(t-t_p) \frac{d}{dt} \varphi^r(t-t_p) + z^r(t-t_p) \frac{d}{dt} z^r(t-t_p)}{2\sqrt{r^2 (\varphi^r(t-t_p))^2 + (z^r(t-t_p))^2}}, & \text{при } t \in (t_p; t_{max}), \\ \sqrt{2gh_0}, & \text{при } t = t_{max}. \end{cases} \quad (4.40)$$

Початкова швидкість зерна на початку розгінної ділянки у другому та третьому рівняннях моделі (4.40) враховується у (4.18) за допомогою початкових умов $C_1 \dots C_4$. Аналогічні початкові умови для руху по гальмівній ділянці визначаються із (4.30) і залежать від максимальної швидкості V_{max} , що набуває зерно наприкінці розгінної ділянки.

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

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

4.2.6 Дослідження геометричних параметрів гвинтового каналу та кінематичних параметрів руху зерна

Збільшення швидкості у верхній частині пристрою обумовлено потребою

убезпечити утворення накопичення зерна на розгінній ділянці та не пересипання його через краї відкритого зернового каналу. Така комбінація забезпечує суттєвий приріст швидкості зернового вантажу на першій ділянці ПВГК. Розгінна ділянка 4 ПВГК (рис. 2.21) повинна мати якомога більший кут нахилу α до горизонту, а гальмівна ділянка 5 з кутом нахилу β , повинна бути дещо меншою від кута α . Обґрунтування співвідношення даних кутів слідує із формул (4.23)–(4.26) та (4.28).

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

Для оптимального вибору кутів потрібно враховувати коефіцієнт тертя μ зерна по поверхні жолобу ПВГК. Крім того, виникають об'єктивні труднощі, щодо визначення оптимального співвідношення кутів розгінної та гальмівної ділянок для різних зернових культур. Для забезпечення стаціонарного потоку зернової маси по гвинтовій поверхні пристрою потрібно враховувати кут природного відкосу зерна, що залежить від сорту зернової культури.

Кут нахилу гальмівної ділянки β повинен бути більшим від кута тертя зерна сільськогосподарської культури ξ [24,78], яке завантажується у силос. Ця умова забезпечує сталий рух зернового вантажу по поверхні каналу. Отже, вибір і співвідношення кутів нахилу розгінної та гальмівної ділянок ПВГК залежить від формули (4.28) та конкретного сорту зерна з відповідним кутом тертя.

Для переважної більшості різновидів зерна сільськогосподарських культур кут тертя лежить в межах від 15^0 до 25^0 в залежності від фізико-механічних властивостей та рівня зволоженості зернової маси. Зважаючи на це, формуючи кути ключових ділянок ПВГК повинні бути більшими від вказаного кутового діапазону, тобто для гальмівної ділянки слід дотримуватися наступної вимоги $\beta > \xi$. В найбільш невідповідних умовах переміщення зернового потоку кут

β приймає значення, що перевищує верхню межу діапазону варіації кута тертя, а саме $-\beta > 25^{\circ}$. При цьому зважаючи на взаємозалежність (4.28) між кутами гальмівної та розгінної ділянки ПВГК, кут α буде більшим від 41° [78].

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

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

Формування геометрії гвинтового каналу в першу чергу вимагає визначитися з кутами нахилу обох ділянок каналу. Так, використовуючи залежність (4.28) між даними кутовими параметрами, була побудована поверхня відгуку (рис. 4.3), що ілюструє характер зміни кута нахилу гальмівної ділянки від кутового параметра ділянки розгону та співвідношення початкової висоти h_0 падіння зерна у гвинтовий канал до радіуса r цього каналу.

З аналізу проілюстрованої залежності встановлюється той факт, що головним чинником формування величини кута β є співвідношення між ключовим габаритним параметром ПВГК – радіусом r каналу та висотою падіння зерна h_0 . Так, з його зростанням від 0,1 до 1 кут нахилу гальмівної ділянки, з врахуванням алгебраїчної різниці з кутом α , збільшується від нульового значення до майже 50° [78]. Приймаючи до уваги накладені вище обмежувальні умови на значення кутів нахилу ділянок каналу, кут β слід формувати відштовхуючись від значення співвідношення h_0/r рівних 0,6...0,7 та вище. У цьому випадку даний кут буде гарантовано перевищувати обмежувальну границю у 25° [78].

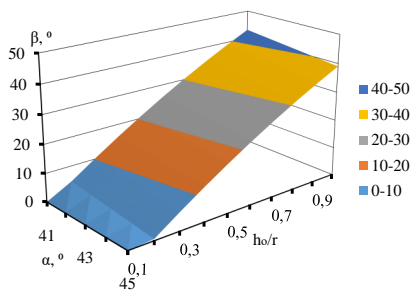
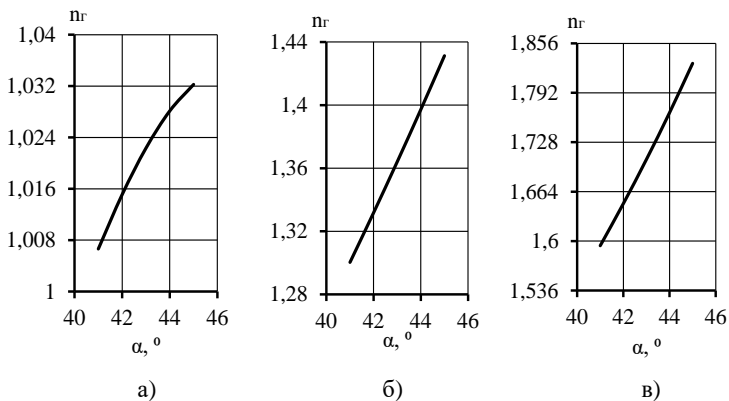


Рисунок 4.3 – Співвідношення кутів α розгінної та β гальмівної ділянки з врахування співвідношення h_o/r .

Наступним показником, що визначає геометричну будову гвинтового каналу, є кількість витків окремо взятої ділянки каналу. Розрахунок кількості витків використовує формули (4.32) і (4.37), та сконцентрований на дотриманні та виконанні декількох умов. По-перше, геометрична висота розгінної та гальмівної ділянки не повинна перевищувати загальну висоту усього гвинтового каналу. По-друге, повинне бути певне співвідношення між ними, щоб забезпечити допустимі межі по тривалості розгону та гальмування зернового потоку.

Так, на рис. 4.4 відображені результати розрахунку необхідної кількості витків для гальмівної ділянки n_r при довільно вибраній чисельності витків ділянки розгону n_p . Розрахунки проводились при сталому співвідношенні $h_o/r=0,7$; висоті гвинтового каналу 1,5...2,5м та в діапазоні зміни кута α від 41^0 до 45^0 [78].



а) – $n_p = 0,8$; б) – $n_p = 1$; в) – $n_p = 1,2$

Рисунок 4.4 – Кількість витків гальмівної ділянки в залежності від кута α та n_p при $h_o/r=0,7$.

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

4.2.7 Програма проведення експериментальних досліджень швидкості руху зерна у запропонованому гвинтовому пристрої

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

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

Відповідно до поставленої мети дослідних експериментів сформована програма досліджень, яка складалась із двох етапів.

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

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

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

Отримані результати експериментальних досліджень опрацьовувались за стандартною методикою статистичної обробки даних. А саме: перевірка на однорідність дисперсій дослідів за критерієм Кохрена, перевірка нормального розподілу залишкового ряду за RS критерієм, знаходження відносної похибки залишків та їх статистичних оцінок, визначення коефіцієнта множинної кореляції, співставлення результатів експериментальних та теоретичних досліджень за величиною відносних похибок між ними. Дані дослідження є підставою для оцінки точності та адекватності запропонованої моделі.

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

У якості зернового матеріалу було використовувалося зерно пшениці

озимої зі середньою вологістю 14%.

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

4.2.8 Результати експериментальних досліджень та їх співставлення з даними теоретичних розрахунків

З метою перевірки адекватності складеної моделі руху зернового потоку по гвинтовому каналу та визначення ступеня відповідності отриманих розрахунковим шляхом параметрів руху їх еквівалентним величинам в реальних умовах протікання гравітаційного руху зерна було здійснено ряд експериментальних досліджень. Дослідження проводились на лабораторному зразку периферійного відкритого гвинтового завантажувального пристрою (ПВГК) зі змінними кутами спуску (рис. 4.5). Рух зернового потоку у гвинтовому каналі у ході проведення теоретичних та експериментальних досліджень оцінювався кількома важливими кінематичними параметрами. До таких було віднесено максимальна швидкість розгону та кінцева швидкість сходу зерна з гвинтового каналу.

Стосовно дискретності зміни факторів впливу, то для першого етапу досліджень було прийнято наступне: висота гвинтового каналу – 2 м; співвідношення h_0/r вибиралось дискретно (0,7; 0,8; 0,9); кількість витків $n_p=1$; кут α змінювалась від 41^0 до 45^0 з кроком в 1^0 ; коефіцієнт тертя зернового матеріалу при русі по металевому каналу приймався рівним $\mu=0,3$ [78].



Рисунок 4.5 – Експериментальний дослідний зразок ПВГК.

На рис. 4.6 відображено характер зміни максимальної швидкості розгону у вибраному діапазоні зміни кута α . В табл. 4.1, як приклад, приведені результати співставлення теоретичних та експериментальних досліджень при $h_0/r = 0,7$.

У відповідності до представлених характеристик, збільшення кута α приводить до зростання швидкості переміщення, при цьому різниця швидкості в крайніх точках діапазону може відрізнятись більше за 0,4 м/с. Це в першу чергу обумовлено підвищенням рівня нахилу розгінної ділянки. Слід також відзначити, що зі збільшенням співвідношення h_0/r , темпи зростання максимальної швидкості розгону більш суттєві. Так, при двох крайніх значеннях цього співвідношення при умові однаковості кута α швидкості відрізняються від 0,1 до 0,4 м/с. Дана тенденція пояснюється збільшенням радіусу r гвинтового каналу, що прямим чином впливає на довжину розгінної ділянки і відповідно на тривалість розгону.

Експериментально було встановлено, що кут α не повинен перевищувати 45° , адже подальше його збільшення призводило до згруження зерна на початку гальмівної ділянки внаслідок швидкого гравітаційного зсуву зернового потоку

межі відхилень для даного багатofакторного експерименту з наявною складністю його натурної реалізації.

Таблиця 4.1 – Результати експериментів по визначенню максимальної швидкості руху на розгінній ділянці ($h_0/r = 0,7$).

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

Для другого етапу програми досліджень фактори впливу набували таких же самих значень як і на першому етапі, співвідношення $h_0/r=0,9$. Кут β при цьому обраховувався на підставі величини кута α за приведеним у теоретичній частині аналітичним виразом (4.28). Правило п'ятикратного повторення експерименту для кожного варіанту значення кутів зберігалось для даного етапу.

Опис процесу руху зернового потоку по жолобу ПВГК, з урахуванням взаємодії зерна із матеріалом, з якого виготовлений жолоб пристрою, використані наступні припущення:

- рух зерна у гвинтовому жолобі відбувається суцільним потоком;
- відцентрові сили, котрі можуть виникати, не дуже впливають на сам характер руху і їх можна не враховувати при визначенні лінійної швидкості;
- між опорною поверхнею, по якій рухається зерновий вантаж виникає

сила тертя ковзання, яка визначається через коефіцієнт тертя між зерном і матеріалом з якого виготовлений жолоб;

– при русі зернового вантажу по гвинтовому жолобу не відбувається накопичення зернових мас у пристрої, в протилежному випадку відбувається втрата інерційного руху.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень по визначенню швидкості (рис. 4.6) зернового потоку при сході з гвинтового каналу приводять до аналогічних висновків.

Статистична обробка результатів досліджень (табл. 4.2) по визначенню кінцевої швидкості також вказує на однорідність дисперсій досліджень, зокрема спостережний критерій Кохрена $G=0,5446$ не перевищує його критичне значення $0,6838$. Значення кінцевої швидкості в межах одного експерименту суттєвим чином не відрізняються від їх усереднених величин. Відносні похибки не перевищують 12%.

За рахунок дотримання чіткого взаємозв'язку між основними геометричними компонентами гвинтового каналу у ході проведених експериментів було виявлено, що кінцева швидкість сходу зерна з каналу (рис. 4.7) знаходиться в межах від 1,8 м/с до 2,2 м/с при середніх розрахункових значеннях біля 1,98 м/с.

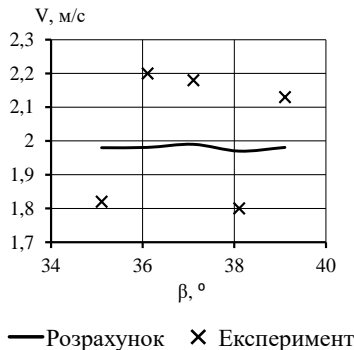


Рисунок 4.7 – Швидкість руху зерна в моменту його сходу з каналу

Таблиця 4.2 – Результати експериментів по визначенню поточної швидкості руху зерна в моменту його сходу з гвинтового каналу ($h_0/r = 0,9$).

Кут, α	Кут, β	Кінцева швидкість $V_{кін}$, м/с					Кінцева швидкість $V_{кін}$, середня	Дисперсія досліду D_1	Теоретична кінцева швидкість $V_{кін}$, м/с	Відносна похибка, δ , %
		1,98	1,9	2,6	2,3	1,9				
41	39	1,98	1,9	2,6	2,3	1,9	2,14	0,0945	1,980909	7,8
42	38	1,8	1,8	1,7	1,8	1,9	1,8	0,005	1,970000	8,6
43	37	2,1	2,2	2,2	2	2,4	2,18	0,022	1,990000	9,5
44	36	2,1	2,2	2	2,4	2,3	2,2	0,025	1,980909	11,1
45	35	1,7	1,7	1,8	1,8	2,1	1,82	0,027	1,980000	8,1
Похибка експерименту									0,18627	
Максимальна дисперсія, D_{max}									0,09448	
Сума дисперсій, ΣD									0,17348	
Спостережене значення критерію Кохрена, G									0,54462	

Таблиця 4.3 – Результати дослідження залишків експериментальних та теоретичних даних кінцевої швидкості руху зерна в момент сходу з каналу.

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

Таким чином статистичний аналіз експериментальних даних та значень залишків кінцевої швидкості сходу зерна (табл. 4.2-4.3) вказують на достатній рівень та точність проведених досліджень. Згідно RS критерію значення залишкового ряду є нормально розподіленими для рівня значущості 0,05 та $n = 25$. Однорідність дисперсій досліджень, коефіцієнт множинної кореляції експериментальних та теоретичних даних кінцевої швидкості $R=0,998$, середня відносна похибка залишків 9,85% та їх нормальний розподіл свідчать про адекватність розробленої моделі.

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

4.3. Теоретичне моделювання процесу гравітаційного завантаження силосу зерном за допомогою відкритого гвинтового каналу

Зменшити травмування зерна при його завантаженні у силос можна здійснити використавши відкритий U-подібний гвинтовий канал. Для цього необхідно провести дослідження динаміки руху зернового потоку у відкритому гвинтовому каналі, який знаходиться на внутрішній стороні силосу і має змінний крок. Даний відкритий периферійний гвинтовий канал (ПВГК), сповільнює рух зернової маси за рахунок зменшення кутів спуску

Гравітаційний потік зернового матеріалу по ПВГК, який знаходиться в емності циліндричної форми (наприклад, силос для зберігання зерна) базується на відомому рівнянні стану сипкого середовища. Рівняння стану сипкого середовища встановлює взаємозв'язок між тиском зернових частинок, швидкістю їх зсуву і пористістю зернового середовища [4,21].

$$P(y) \cdot \varepsilon(y) = \chi \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^2, \quad (4.41)$$

де $P(y)$ – аналог гідростатичного тиску;

$\varepsilon(y)$ – пористість зернового середовища;

χ – коефіцієнт, який характеризує фізико-механічні властивості зерна та стан всього зернового середовища;

$\left(\frac{du}{dy}\right)^2$ – квадрат швидкості переміщення сипкого зернового середовища.

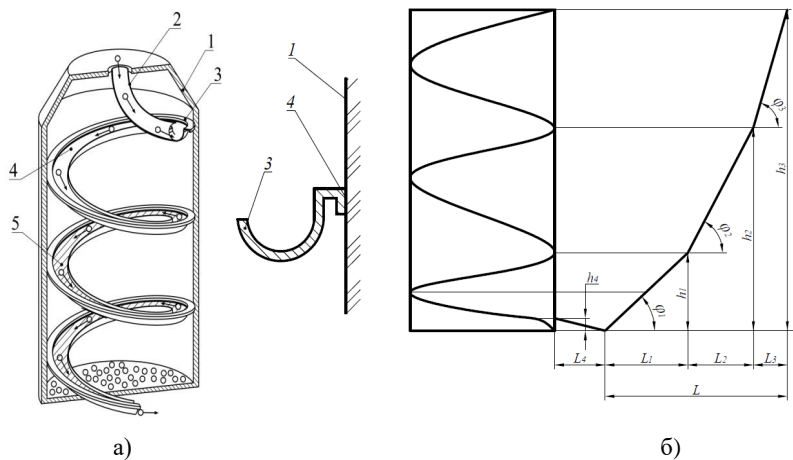
Рівняння (4.41) показує, що добуток котрий знаходиться у лівій його частині за фізичним змістом тотожний питомій роботі, яка іде на ділатансію зернового шару в розрахунку на 1м^3 твердого середовища. Права частина відповідає кінетичній енергії, яка витрачається на хаотичне частково структуроване переміщення зернового середовища у ПВГК.

Відомо, що рух сипкого зернового матеріалу у відкритих жолобах залежить від фізико-механічних властивостей зерна, головні з яких щільність, шорсткість, хрупкість, коефіцієнти внутрішнього та зовнішнього тертя та інші.

Швидкість руху зернового потоку у відкритому ПВГК є домінуючим фактором, котрий суттєво впливає на ступінь пошкодження зерна під час завантаження його у циліндричні ємності із значної висоти [122]. Для зменшення швидкості хвильового та порційного руху зернового матеріалу по ПВГК крок гвинтової лінії зменшується зверху до низу.

На рис. 4.8,а представлений спіральний завантажувач силосів який виконано по відкритій гвинтовій поверхні U-подібного профілю, з перемінним кроком, а на рисунку 4.8,б наведена його розгортка.

Для формалізації процесу переміщення зернового потоку по ПВГК прийняті наступні обмеження: рух зерна відбувається у вигляді потоку, а зерно в процесі руху по робочій поверхні зберігає свою форму, масу і не ушкоджується.



а – гвинтова лінія U – подібного жолоба з перемінним кроком; б – розгортка гвинтової лінії по якій виконаний жолоб (L_1, L_2, L_3 – відповідно довжини гвинтових ліній з різними кутами $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$); 1 – циліндрична ємність; 2 – горловина; 3 – відкритий гвинтовий канал; 4 – кріплення; 5 – хвостовик.

Рисунок 4.8 – Силос зі спіральним завантажувачем.

При цьому рух зернового матеріалу у U-подібному профілю за гвинтовою лінією з перемінним кроком носить досить складний характер, тому сумарну кінетичну енергію переміщення елементарного шару сипкого матеріалу (рис.4.9) можна представити як суму кінетичних енергій поступального руху (зсуву), хаотичного руху (флуктуації) зерен та колового масопереносу[21].

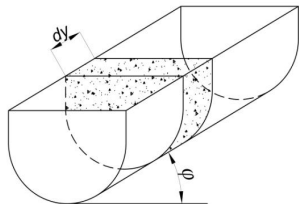


Рисунок 4.9 – Розрахункова схема для визначення кінетичної енергії елементарного шару сипкого матеріалу в жолобі [4].

Сумарна кінетична енергія переміщення елементарного шару сипкого матеріалу:

$$T_{\text{сум}} = T_n + T_\phi + T_m \quad (4.42)$$

де T_n – кінетична енергія поступального переміщення сипкого шару зерна по ВПГК;

T_ϕ – кінетична енергія хаотичного переміщення зерна (флуктуація) у середині сипкого шару зерна;

T_m – кінетична енергія колового масопереносу сипкого зернового матеріалу відносно центральної осі циліндричної ємності.

Кінетична енергія елементарного dy шару зерна у відносному поступальному русі на першій ділянці з кутом ϕ , можна представити наступним виразом:

$$T_n = \frac{1}{2} m_3 \cdot (\Delta y)^2 \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^2, \quad (4.43)$$

де m_3 – маса елементарного зернового об'єму, який знаходиться у гвинтовому каналі на довжині dy ;

(Δy) – різниця координат суміжних зернових шарів.

Маса елементарного об'єму зерна, який знаходиться у ПВГК на нескінченно малій довжині dy становить:

$$m_3 = S \cdot dy \cdot \rho, \quad (4.44)$$

де S – площа поперечного перерізу гвинтового каналу (рис.4.10);

ρ – насипна щільність зерна.

Площа поперечного перерізу U-подібного робочого органу визначається за виразом:

$$S = \frac{\pi r^2}{2} + 2rc = \frac{r}{2} (\pi r + 4c), \quad (4.45)$$

де r, c – відповідно радіус і висота гвинтового каналу.

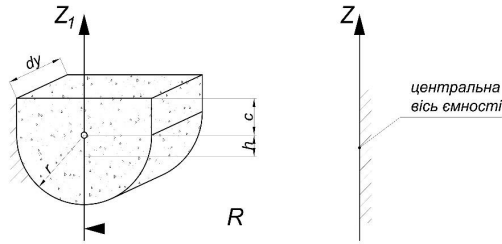


Рисунок 4.10 – Розрахункова схема для визначення моменту інерції зернового шару елементарного об’єму відносно центральної осі силосу.

Підставивши (4.45) в (4.44) отримаємо величину маси елементарного об’єму зерна, що знаходиться в жолобі гвинтового каналу:

$$m_3 = \frac{r}{2}(\pi r + 4c)\rho \cdot dy . \quad (4.46)$$

Враховуючи те, що переміщення елементарних зернових шарів сипкого матеріалу відбувається в робочому органі зі зміною різниці координат то:

$$\Delta y = y_1 - y_2 , \quad (4.47)$$

де y_1, y_2 – відповідно координати центрів суміжних зернових шарів які рухаються під дією сили тяжіння вниз по ПВГК із змінним кутом нахилу.

Підставивши (4.46), (4.47) в (4.43) отримаємо:

$$T_n = \frac{r}{4}(\pi r + 4c)\rho \cdot (y_1 - y_2)^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 \cdot dy . \quad (4.48)$$

В процесі гравітаційного переміщення зернового матеріалу по ПВГК, який опоясує внутрішню сторону циліндричної ємності (наприклад, силосі для зберігання зерна), виникають ударні імпульси між окремими зернинками зернового потоку. В загальному випадку ударні імпульси, це результат косих ударів зернин у зерновому потоці згідно з [4,93] визначаються за методом Аккермана-Шена:

$$\gamma = \frac{\tau}{E \cdot z} \cdot \frac{du}{dy}, \quad (4.49)$$

де τ – напруга зсуву;

E – кінетична енергія дисипації двох зернин при одному їх контактї;

z – кількість зернин в елементарному об'ємі зернового шару довжиною dy

Знаючи середню частоту співударів, є можливість визначити і середню швидкість флуктації зерен. Для цього скористаємося формулою наведеною в літературі [93]:

$$(\bar{u}^{\text{в}})^2 = \gamma \cdot b, \quad (4.50)$$

де b – середня відстань між двома зернинами відносно їх приведених мас.

Кінетична енергія при хаотичному переміщенні зернової маси у ПВГК відбувається за рахунок зміни відносних дотичних швидкостей окремих зернин в результаті їх косих ударів. Така кінетична енергія визначається за наступним виразом:

$$T_{\phi} = \frac{1}{2} m_3 \cdot (\bar{u}')^2. \quad (4.51)$$

Підставивши (4.46), (4.49) і (4.50) в (4.51) отримаємо:

$$T_{\phi} = \frac{1}{4} r(\pi r + 4c) \rho \left(\frac{\tau \cdot du}{E \cdot z \cdot dy} \right)^2 b^2 dy. \quad (4.52)$$

Внаслідок того, що сили для зберігання зерна мають значні габаритні розміри, то встановлення гвинтового каналу на внутрішній поверхні силосу, приводить до того, що зернова маса рухається не тільки поступально, а й здійснює незначний обертальний рух відносно центральної осі силосу. В такому випадку кінетична енергія колового масопереносу [4.121] буде:

$$T_m = \frac{1}{2} I_z \cdot \omega^2, \quad (4.53)$$

де I_z – момент інерції суцільного зернового середовища об'ємом dv , що знаходиться у ПВГК і рухається відносно центральної осі силосу радіуса R ;

ω – кутова швидкість.

Момент інерції суцільного зернового середовища елементарного об'єму dv і форми, що відповідає формі гвинтового каналу у його поперечному перерізі згідно формули Гюйгенса-Штейнера [4,21] буде:

$$I_z + I_{z_1} + m_3 R, \quad (4.54)$$

де I_{z_1} – момент інерції зернового шару елементарного об'єму відносно центральної осі симетрії поперечного перерізу гвинтового каналу (рис.4.4);

R – радіус силосної ємності.

Момент інерції I_{z_1} складається із моментів інерції окремих фігур, з яких виготовлено периферійний гвинтовий канал. Тоді:

$$I_{z_1} = \frac{1}{16} m_3 r + \frac{1}{2} m_3 h, \quad (4.55)$$

де $h = \frac{2r}{3\pi}$.

Або

$$I_z = \frac{r^2}{32} (\pi r + 4c) \rho \cdot dy + \frac{r^3}{54\pi^2} (\pi r + 4c) \rho \cdot dy + \frac{r}{2} (\pi r + 4c) \rho \cdot R^2 dy. \quad (4.56)$$

Підставивши (4.56) в (4.53) і провівши деякі перетворення та врахувавши, що $\omega = V/R$ отримаємо:

$$T_m = \frac{r}{4} (\pi r + 4c) \cdot \rho \cdot \left(\frac{V}{R} \right)^2 \left(\frac{r}{16} + \frac{r^2}{27\pi^2} + R \right) dy. \quad (4.57)$$

Загальна кінетична енергія зернового потоку буде:

$$\begin{aligned} T_{\text{сум}} = & \frac{r}{4} (\pi r + 4c) \rho (y_1 - y_2)^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 dy + \frac{r}{4} (\pi r + 4c) \rho \left(\frac{\tau du}{Ez dy} \right)^2 b^2 dy + \\ & + \frac{r}{4} (\pi r + 4c) \rho \left(\frac{r}{16} + \frac{r^2}{27\pi} + R^2 \right) \cdot \left(\frac{V}{R} \right)^2 dy = \frac{r}{4} (\pi r + 4c) \rho \left(\frac{du}{dy} \right)^2 dy [(y_1 - y_2)^2 + \\ & + \left(\frac{\tau b}{Ez} \right)^2 + \left(\frac{r}{16} + \frac{r^2}{27\pi} + R^2 \right) \cdot \left(\frac{V}{R} \right)^2 \left(\frac{dy}{du} \right)^2]. \end{aligned} \quad (4.58)$$

У формулу (4.58) входить дисипація кінетичної енергії (E), яка виникає внаслідок одного зіткнення двох зернонок. Ця енергія може бути визначена [4,93] так:

$$E = \frac{1}{2} m_3 \left(\frac{1-K^2}{4} + \frac{f(1+K)}{\pi} - \frac{f(1+K)^2}{4} \right) (\bar{u}')^2, \quad (4.59)$$

де K – коефіцієнт відновлення під час удару;

f – коефіцієнт тертя між окремими зернами;

$(\bar{u}')^2$ – швидкість флуктації зерен під час переміщення по гвинтовому каналі.

Швидкість флуктації зерен під час руху по ПВГК може бути визначена через зміну відносної дотичної швидкості отриманої зернами в результаті косих ударів:

$$\bar{u}' = -\Delta u / f(1+K), \quad (4.60)$$

де Δu – зміна відносної дотичної швидкості отриманої зернами в результаті косих ударів.

Дисипація кінетичної енергії з урахуванням (4.46 і (4.60) буде:

$$\begin{aligned} E &= \frac{\Delta u^2}{4f^2(1+K)^2} r(\pi r + 4c)\rho \left(\frac{1-K^2}{4} + \frac{f(1+K)}{\pi} - \frac{f(1+K)^2}{4} \right) dy = \\ &= \frac{\Delta u^2}{4} r(\pi r + 4c)\rho \left(\frac{1-K}{4f^2(1+K)} + \frac{1}{\pi f(1+K)} - \frac{1}{4f} \right) dy = \\ &= \frac{\Delta u^2 r(\pi r + 4c)\rho}{16f^2\pi(1+K)} [\pi(1-K) + 4f - f\pi(1+K)] dy. \end{aligned} \quad (4.61)$$

Зробивши деякі спрощення у формулі (4.61) позначивши вирази $[\pi(1-K) + 4f - f\pi(1+K)] = g$, а $\frac{r}{2}(\pi r + 4c)dy = dv$. Після підстановки спрощень формула дисипації кінетичної енергії набуває такого вигляду:

$$E = \frac{\Delta u^2 dv \cdot \rho \cdot g}{8f^2(1+K)\pi}, \quad (4.62)$$

де dv – елементарний об'єм зернового шару, який знаходиться у відкритому U-подібному периферійному гвинтовому каналі.

Отримані залежності (4.58) і (4.62) являються математичною моделлю, яка характеризує загальну кінетичну енергію переміщення елементарних об'ємів зерна у відкритому гвинтовому каналі і враховує фізико-механічні властивості сипкого матеріалу та форму самого силосу.

Підставивши (4.58) в (4.41) отримаємо рівняння стану сипкого зернового середовища, котре під дією гравітаційної сили переміщається у відкритому периферійному гвинтовому каналі циліндричної ємності, в наступному вигляді:

$$\rho \cdot \bar{\varepsilon} = \chi \frac{r}{4} (\pi r + 4c) \rho \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \left[(y_1 - y_2)^2 + \left(\frac{\tau \cdot b}{E \cdot z} \right)^2 + \left(\frac{r}{16} + \frac{r^2}{27\pi} + R^2 \right) \left(\frac{Vdy}{Rdu} \right)^2 \right] dy. \quad (4.63)$$

де $\bar{\varepsilon}$ – середня пористість зернового середовища.

Одержані залежності (4.58), (4.62) і (4.63) можуть бути використані для аналізу та обґрунтування параметрів відкритого периферійного гвинтового каналу, котрий можна використовувати для обережного завантаження циліндричних ємностей типу силос зерном.

Отримане рівняння стану сипкого зернового середовища, котре під дією гравітаційних сил рухається у гвинтовому каналі, дає можливість дослідити рух зернового середовища у жолобі, який має форму гвинтової лінії і знаходиться в середині циліндричної ємності. Для зменшення швидкості переміщення зернового потоку пропонується гвинтовий канал виконувати з перемінним кроком.

4.4. Математичне дослідження руху зерна по гвинтовій поверхні із різним кроком гвинта

Розглянемо в плоскій системі координат дві точки з координатами (x_0, y_0) і $B(x_k, y_k)$ [74]. Необхідно визначити профіль гвинтового каналу зі змінним кутом спуску, по якому зернова маса буде спускатися від точки А до точки В. На початку процесу завантаження (точка А) зерновий матеріал знаходиться над ємністю, в результаті завантаження він опиняється в ємності в тому чи іншому горизонтальному шарі, розміщеному нижче початкового положення (рис.4.11).

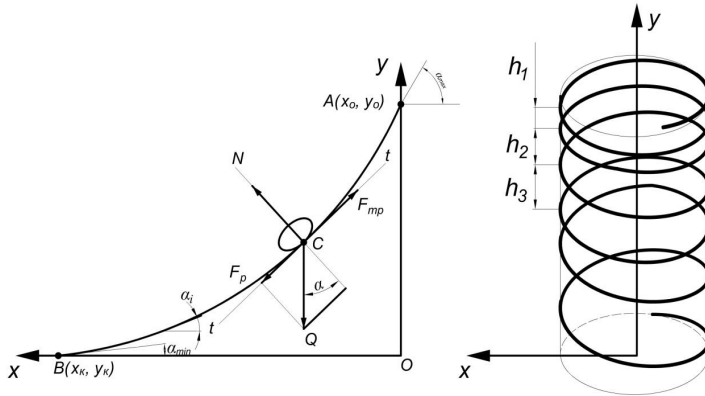


Рисунок 4.11 – Схема сил, що діють на елемент зернової маси під час руху по гвинтовій поверхні.

Нехай зерновий матеріал рухаючись по ПВГК доходить до точки С. В цій точці на зернову масу діють три сили: вага виділеного елемента зернової маси Q , нормальна реакція гвинтового каналу N і сила тертя F_T .

Закон руху елемента зернової маси в напрямку дотичної, яка позначена на рисунку 4.11, як вісь $t-t$ має вид:

$$m \frac{d^2 l}{dt^2} = Q \cdot \sin \alpha(l) - Q \cdot f_T \cdot \cos \alpha(l), \quad (4.64)$$

або

$$\frac{d^2 l}{dt^2} = g \cdot \sin \alpha(l) - Q \cdot f_T \cdot \cos \alpha(l)$$

Прийнявши, що $\alpha(l)$ змінюється за законом, $\alpha(l) = -a \cdot l + \alpha_{\min}$.

де a – постійний коефіцієнт;

α_{\min} – найменший кут спуску.

$$\frac{d^2 l}{dt^2} = g \cdot \gamma \cdot n \cdot (-a \cdot l + \alpha_{\min}) - g \cdot f_T \cdot \cos(-a \cdot l + \alpha_{\min})$$

Розділивши змінні:

$$\frac{d^2 l}{g \cdot \sin(-a \cdot l + \alpha_{\min}) - g \cdot f_T \cdot \cos(-a \cdot l + \alpha_{\min})} = dt^2, \quad (4.65)$$

або

$$\left(\int \frac{dl}{g \cdot \sin(-a \cdot l + \alpha_{\min}) - g \cdot f_T \cdot \cos(-a \cdot l + \alpha_{\min})} \right) dl = \left(\int dt \right) dt$$

Провівши деякі зміни позначивши: $x = -a \cdot l + \alpha_{\min}$; $dx = -a \cdot dl$, тоді:

$$\left(-\frac{1}{ag} \int \frac{dx}{\sin x - f_T \cos x} \right) dl = (t + C) dt.$$

Розглянувши лівий інтеграл, та ввівши універсальну тригонометричну підстановку, отримаємо:

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} tg \frac{x}{l} &= t \\ \sin x &= \frac{2 \cdot t}{1+t^2} \\ \cos x &= \frac{1-t^2}{1+t^2} \\ dx &= \frac{2 \cdot dt}{1+t^2} \end{aligned} \right\} \\ &= -\frac{1}{a \cdot g} \int \frac{\frac{2}{1+t^2} dt}{\frac{2 \cdot t}{1+t^2} - f_T \cdot \frac{1-t^2}{1+t^2}} = -\frac{1}{a \cdot g} \int \frac{2t}{2 \cdot t - f_T + f_T \cdot t^2} = -\frac{2}{a \cdot f_T \cdot g} \int \frac{dt}{t^2 + \frac{2}{f_T} \cdot t - 1} \\ &= \frac{-2}{a \cdot t \cdot g} \int \frac{dt}{\left(t^2 + \frac{2t}{f_T} + \frac{1}{f_T^2} \right) - \frac{1}{f_T^2} - 1} = -\frac{2}{af_T g} \int \frac{dt}{\left(t + \frac{1}{f_T} \right)^2 - \left(1 + \frac{1}{f_T^2} \right)}. \end{aligned}$$

Використавши табличний інтеграл:

$$\int \frac{dx}{x^2 - z^2} = \frac{1}{2z} \ln \left| \frac{x-l}{x+l} \right| + C, \text{ тоді де } z = \frac{\sqrt{f_T^2 + 1}}{f_T}$$

Тоді ліва частина інтегралу набуде наступний вид:

$$\begin{aligned} -\frac{2}{2zf_T g \frac{\sqrt{f_T^2 + 1}}{f_T}} \ln \left| \frac{t + \frac{1}{f_T} - \frac{\sqrt{f_T^2 + 1}}{f_T}}{t + \frac{1}{f_T} + \frac{\sqrt{f_T^2 + 1}}{f_T}} \right| + C &= \frac{-1}{zg \sqrt{f_T^2 + 1}} \ln \left| \frac{f_T t - \sqrt{f_T^2 + 1} + 1}{f_T t + \sqrt{f_T^2 + 1} + 1} \right| + C = \\ &= -\frac{1}{zg \sqrt{f_T^2 + 1}} \ln \left| \frac{f_T tg \frac{x}{2} - \sqrt{f_T^2 + 1} + 1}{f_T tg \frac{x}{2} + \sqrt{f_T^2 + 1} + 1} \right| + C. \end{aligned} \quad (4.66)$$

прих $= -a \cdot l + \alpha_{\min}$ маємо

$$-\frac{1}{zg \sqrt{f_T^2 + 1}} \ln \left| \frac{f_T tg \left(-\frac{al + \alpha_{\min}}{2} \right) - \sqrt{f_T^2 + 1} + 1}{f_T tg \left(-\frac{al - \alpha_{\min}}{2} \right) + \sqrt{f_T^2 + 1} + 1} \right| + C.$$

Тоді:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{-(t+C)}{\left| -\frac{1}{zg\sqrt{f_T^2+1}} \ln \frac{f_T \operatorname{tg}\left(-\frac{al+\alpha_{\min}}{2}\right) - \sqrt{f_T^2+1} + 1}{f_T \operatorname{tg}\left(-\frac{al+\alpha_{\min}}{2}\right) + \sqrt{f_T^2+1} + 1} \right|}$$

або

$$\frac{dl}{dt} = \frac{zg\sqrt{f_T^2+1}(t+C)}{-\ln \frac{f_T \operatorname{tg}\left(-\frac{al+\alpha_{\min}}{2}\right) - \sqrt{f_T^2+1} + 1}{f_T \operatorname{tg}\left(-\frac{al+\alpha_{\min}}{2}\right) + \sqrt{f_T^2+1} + 1}}. \quad (4.67)$$

Спростивши вираз (4.67) отримаємо кінцеве значення швидкості руху зернового потоку по відкритому гвинтовому каналу:

$$V = \frac{dl}{dt} = \frac{zg\sqrt{f_T^2+1}(t+C)}{-\ln \left| 1 + \frac{2\sqrt{f_T^2+1}}{f_T \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} + 1 + \sqrt{f_T^2+1}} \right|}. \quad (4.68)$$

де C – довільна постійна величина, яка визначається із умови: $t = 0$;

$$V = V_0; C = V_0.$$

З отриманого виразу випливає, що із зменшенням кута α в ПВГК рух зернового потоку стабілізується. Це відбувається тому, що підштовхуюча сила верхніх шарів зернової маси зменшується і в нижній частині переходить із змінної величини на більш постійну, тому в нижній частині пристрою рух зернового матеріалу відбувається практично з постійною лінійною швидкістю. В наслідок чого зерно менше травмується в нижній частині силосу.

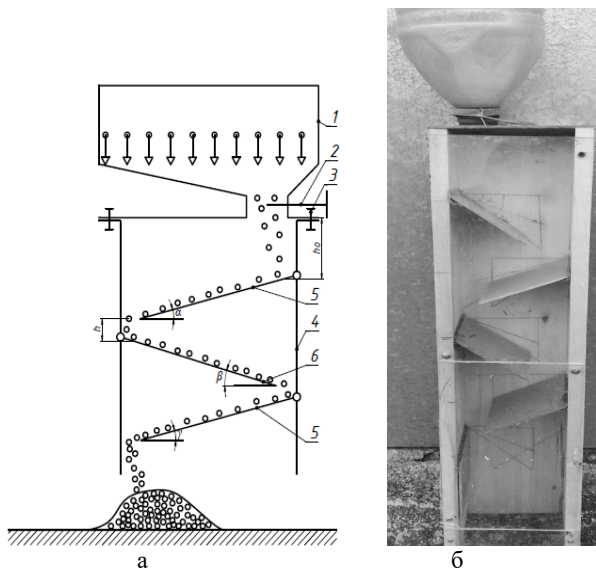
4.5. Математичне моделювання руху зерна у гравітаційно-каскадній установці

4.5.1. Обґрунтування математичної моделі руху зерна по пересипним полицям

Завантаження силосів, зокрема, висотних неоднорідними за розмірами

формою та масою зернівками веде до розшарування зернового матеріалу за щільністю, тобто до появи в середині ємності сегрегації [24,77,78,103]. Це явище виникає під час руху зернового матеріалу по поверхні насипу і при падінні його з висоти. Сегрегація при гравітаційному завантаженні, відбувається і під час вільного падіння з висоти. Розшарування зернового матеріалу по фракціям в середині силосу суттєво ускладнює процес вивантаження і може значно погіршити якість зерна. Для усунення цих негативних явищ можна використати гравітаційно-каскадну установку, опис котрої виконаний у другому розділі.

Установка (рис.4.12) складається із бункера 1, заслінки 2, кріплення 3, металевого корпусу у вигляді паралелепіпеду 4, в середині якого шарнірно встановлені чотири пересипні полиці, із них 5 розгінні, а 6 гальмівні[138]. Кути нахилу пересипних полиць встановлюються за допомогою спеціального пристрою (на рисунку не показаний).



а) принципова схема; б) дослідний зразок.

Рисунок 4.12 – Схема гравітаційно-каскадної установки з чотирма пересипними полицями.

Розглянемо рух зерна по пересипним полицям гравітаційно-каскадної установки, що складається з чотирьох пересипних полиць, а саме з двох розгінних полиць довжиною l_1 та кутами нахилу α , та двох гальмівних полиць довжиною l_2 і кутами нахилу β та γ відповідно.

Під час руху зерна виникає внутрішнє тертя всередині зернового потоку і зовнішнє тертя, яке виникає між полицями і зовнішнім шаром зернової маси. Будемо вважати, що потік зерна висипається з гофрованого рукава рівномірно та з однаковою швидкістю, тобто маємо стаціонарний потік. Необхідно щоб кінцева швидкість зерна в кінці руху по другій гальмівній полиці була однаковою з початковою швидкістю потоку на початку першої розгінної полиці, але не менша за неї $V_{\text{поч}} \leq V_{\text{кін}}$. Дана умова забезпечить обережне завантаження зернової маси без травмування зернівок, а також сприятиме проходженню зерна без його накопичення на ділянках гальмівних полиць. Для спрощення подальших розрахунків будемо вважати, що ці швидкості рівні між собою $V_{\text{поч}} = V_{\text{кін}} = V_0$. Відстань між всіма 4-ма полицями є однаковою

Для запобігання травмуванню початкову швидкість V_0 зерно набуває в результаті його падіння з отвору бункера, котрий знаходиться на висоті h_0 від краю першої розгінної полиці. В момент падіння зернової маси з отвору бункера на початковий край першої розгінної ділянки відбувається перехід її потенціальної енергії в кінетичну, в результаті чого зерно набуває швидкість V_0 .

Використовуючи закон збереження енергії маємо початкову швидкість зерна $v_0 = \sqrt{2gh_0}$.

Продовжуючи рух, зерновий потік пришвидшує свою швидкість до V_{max} проходячи шлях l_1 по першій розгінній ділянці, розташованій під кутом α до горизонту. Це відбувається в результаті переходу частини потенціальної енергії зерна $E_{n1} = mgl_1 \sin \alpha$ в кінетичну. Врахувавши силу тертя між шаром зерна та поверхнею пластини з коефіцієнтом тертя μ , яка чинить спротив розгону зернової маси маємо спрощене рівняння, що описує перетворення енергії зернового потоку на першій розгінній полиці:

$$\frac{mV_0^2}{2} \sin \alpha + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha = \frac{mV_{\max}^2}{2}. \quad (4.69)$$

Після проходження I-ої розгінної полиці зерно падає з відстані h , що є усередненим значенням траєкторій падіння зернівок (рис. 4.12) на I гальмівну полицю. Використовуючи закон збереження енергії та врахувавши кути нахилу розгінної та гальмівної ділянок маємо:

$$\left(\frac{mV_{\max}^2}{2} \sin \alpha + mgh \right) \sin \beta$$

Рух зернового потоку по I гальмівній полиці довжиною l_2 розміщеної під кутом β до горизонту, відбувається за рахунок попередньо набутої максимальної кінетичної енергії на I розгінній полиці, додатково набутої кінетичної енергії під час падіння з висоти h та потенціальної енергії зерна $E_{n2} = mgl_2 \sin \beta$. В той же час даному процесу протидіє робота сили тертя $A_2 = \mu mgl_2 \cos \beta$, яка за рахунок меншого кута нахилу $\beta \leq \alpha$ є вже значно більшою і зумовлює зменшення швидкості руху зернового потоку з V_{\max} до $\frac{2V_{\max}}{3}$. Таким чином після проходження першої гальмівної ділянки в модель закладається зменшення максимальної швидкості руху зерна на третину, що повинно запобігти накопиченню зернової маси. Із закону збереження енергії маємо:

$$\left(\frac{mV_{\max}^2}{2} \sin \alpha + mgh \right) \sin \beta + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta = \frac{m \left(\frac{2V_{\max}}{3} \right)^2}{2}.$$

Після проходження I-ої гальмівної полиці зерно знову падає з відстані h на II розгінну полицю. Використовуючи закон збереження енергії та врахувавши кути нахилу розгінної та гальмівної ділянок маємо $\left(\frac{2mV_{\max}^2}{9} \sin \beta + mgh \right) \sin \alpha$.

Продовжуючи рух по полиці, зерновий потік пришвидшує свою швидкість із $\frac{2V_{\max}}{3}$ до швидкості V , $\left(\frac{2V_{\max}}{3} \leq V \leq V_{\max} \right)$.

Рух зернового потоку по II гальмівній полиці розміщеній під кутом γ до горизонту, відбувається аналогічно за рахунок попередньо набутої кінетичної та потенціальної енергії, якій протидіє робота сили тертя, яка за рахунок меншого кута нахилу γ ($\beta \leq \alpha$) є вже значно більшою і спричиняє зменшення швидкості руху зернового потоку з V до початкової V_0 .

4.5.2. Аналітична модель контрольованого руху зерна

Об'єднавши вище наведені залежності, що визначають рух зерна по розгінним та гальмівним ділянками, отримаємо аналітичну модель гравітаційного руху зерна по полицям гравітаційно-каскадної установки:

$$\left\{ \begin{array}{l} mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2} \\ \frac{mV_0^2}{2} \sin \alpha + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha = \frac{mV_{\max}^2}{2} \\ \left(\frac{mV_{\max}^2}{2} \sin \alpha + mgh \right) \sin \beta + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta = \frac{2mV_{\max}^2}{9} \\ \left(\frac{2mV_{\max}^2}{9} \sin \beta + mgh \right) \sin \alpha + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha = \frac{mV^2}{2} \\ \left(\frac{mV^2}{2} \sin \alpha + mgh \right) \sin \beta + mgl_2 \sin \gamma - \mu mgl_2 \cos \gamma = \frac{mV_0^2}{2} \end{array} \right. \quad (4.70)$$

Для знаходження співвідношень, що визначатимуть залежності між кутами нахилу розгінних та гальмівних ділянок розв'яжемо систему (4.70). З першого, другого і третього рівняння системи (4.70) маємо рівняння що визначає $\angle \beta$ через заданий $\angle \alpha$:

$$\begin{aligned} & \left((h_0 + l_1) \sin^2 \alpha - \mu l_1 \sin \alpha \cos \alpha + h + l_2 \right) \sin \beta - \mu l_2 \cos \beta = \\ & = \frac{4}{9} (h_0 \sin \alpha + l_1 \sin \alpha - \mu l_1 \cos \alpha) \end{aligned} \quad (4.71)$$

Прирівнявши друге, четверте і п'яте рівняння системи (4.70) маємо:

$$\left[\frac{4}{9}(h_0 + l_1)\sin^3 \alpha \sin^2 \beta - \frac{4}{9}\mu l_1 \cos \alpha \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + (h + l_1)\sin^2 \alpha \sin \beta - \frac{1}{2}\mu l_1 \sin 2\alpha \sin \beta \right] + \\ + l_2 \sin \gamma - \mu l_2 \cos \gamma = h_0 - h \sin \beta$$

Спростивши вираз отримаємо рівняння що визначає γ через кути α і β :

$$l_2 \sin \gamma - \mu l_2 \cos \gamma = h_0 - h \sin \beta - \frac{4}{9}(h_0 + l_1)\sin^3 \alpha \sin^2 \beta + \frac{4}{9}\mu l_1 \cos \alpha \sin^2 \alpha \sin^2 \beta - \\ - (h + l_1)\sin^2 \alpha \sin \beta + \frac{1}{2}\mu l_1 \sin 2\alpha \sin \beta \quad (4.72)$$

Розв'яжемо рівняння (4.71), для цього перший коефіцієнт зліва і праву сторону рівняння (4.71) позначимо через a і b відповідно. Отримаємо тригонометричні рівняння виду:

$$a \sin \beta - \mu l_2 \cos \beta = b, \\ a = \left((h_0 + l_1)\sin^2 \alpha - \mu l_1 \sin \alpha \cos \alpha + h + l_2 \right), \\ b = \frac{4}{9}(h_0 \sin \alpha + l_1 \sin \alpha - \mu l_1 \cos \alpha)$$

Розв'яжемо рівняння за допомогою переходу до половинного кута:

$$(\mu l_2 - b) \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} + 2a \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - (\mu l_2 + b) = 0$$

Введемо заміну $y = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}$ і розв'яжемо отримане рівняння:

$$(\mu l_2 - b)y^2 + 2ay - (\mu l_2 + b) = 0.$$

$$D = 4a^2 + 4(\mu^2 l_2^2 - b^2)$$

$$y = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 + (\mu^2 l_2^2 - b^2)}}{\mu l_2 - b}$$

Повернувшись до заміни і врахувавши, що кути α і β лежать в межах від 0 до $\frac{\pi}{2}$ отримаємо рівняння, що описує залежність кута β від кута α :

$$\beta = 2 \arctg \left(\frac{-a + \sqrt{a^2 + (\mu^2 l_2^2 - b^2)}}{\mu l_2 - b} \right) + 2\pi k \quad (4.73)$$

Аналогічно розв'яжемо рівняння (4.72), ввівши відповідні заміни:

$$\begin{aligned}
 d &= c \sin \beta - \mu l_2 \cos \beta \\
 c &= l_2 \\
 d &= h_0 - h \sin \beta - \frac{4}{9}(h_0 + l_1) \sin^3 \alpha \sin^2 \beta + \frac{4}{9} \mu l_1 \cos \alpha \sin^2 \alpha \sin^2 \beta - \\
 &\quad - (h + l_1) \sin^2 \alpha \sin \beta + \frac{1}{2} \mu l_1 \sin 2\alpha \sin \beta
 \end{aligned}$$

Маємо:

$$\gamma = 2 \arctg \left(\frac{-c + \sqrt{c^2 + (\mu^2 l_2^2 - d^2)}}{\mu l_2 - d} \right) + 2\pi k \quad (4.74)$$

Отримаємо систему рівнянь, що визначає кути β і γ через заданий кута:

$$\left\{ \begin{aligned}
 a &= (h_0 + l_1) \sin^2 \alpha - \mu l_1 \sin \alpha \cos \alpha + h + l_2 \\
 b &= \frac{4}{9}(h_0 \sin \alpha + l_1 \sin \alpha - \mu l_1 \cos \alpha) \\
 \beta &= 2 \arctg \left(\frac{-a + \sqrt{a^2 + (\mu^2 l_2^2 - b^2)}}{\mu l_2 - b} \right) + 2\pi k \\
 c &= l_2 \\
 d &= h_0 - h \sin \beta - \frac{4}{9}(h_0 + l_1) \sin^3 \alpha \sin^2 \beta + \frac{4}{9} \mu l_1 \cos \alpha \sin^2 \alpha \sin^2 \beta - \\
 &\quad - (h + l_1) \sin^2 \alpha \sin \beta + \frac{1}{2} \mu l_1 \sin 2\alpha \sin \beta \\
 \gamma &= 2 \arctg \left(\frac{-c + \sqrt{c^2 + (\mu^2 l_2^2 - d^2)}}{\mu l_2 - d} \right) + 2\pi k
 \end{aligned} \right. \quad (4.75)$$

Отримана аналітична модель визначена системами рівнянь (4.70) і (4.75), вона визначає залежність кутів β і γ нахилу гальмівних полиць від кута нахилу розгінних полиць. Модель враховує початкову висоту падіння зерна h_0 на першу розгінну ділянку, відстань між полицями h , довжини розгінної та гальмівної ділянок l_1 та l_2 , а також коефіцієнт тертя μ між шаром зерна та матеріалом полиць. Параметрами для проведення досліджень були кути β і γ нахилу полиці I і II гальмівних ділянок відповідно.

4.5.3. Результати теоретичних досліджень руху зерна по переситним полицям

У ході експериментальних досліджень доводиться правдивість виконання прийнятної умови ідентичності початкової швидкості надходження зерна до гравітаційно-каскадної установки та швидкості сходу з неї при практичному застосуванні теоретично обґрунтованих геометричних параметрів даної установки. В результаті експериментальних досліджень був сформульований висновок про рівень адекватності складеної аналітичної моделі.

Теоретичні дослідження проводились з урахуванням наступних умов:

– висота падіння h зерна з однієї полиці на іншу приймалась постійною та становила 0,2м;

– довжина усіх полиць гальмівних та розгінних ділянок дорівнюють між собою, $l_1 = l_2 = l$;

– висота падіння h зерна з бункера на першу полицю гравітаційно-каскадної установки становить 0,3м.

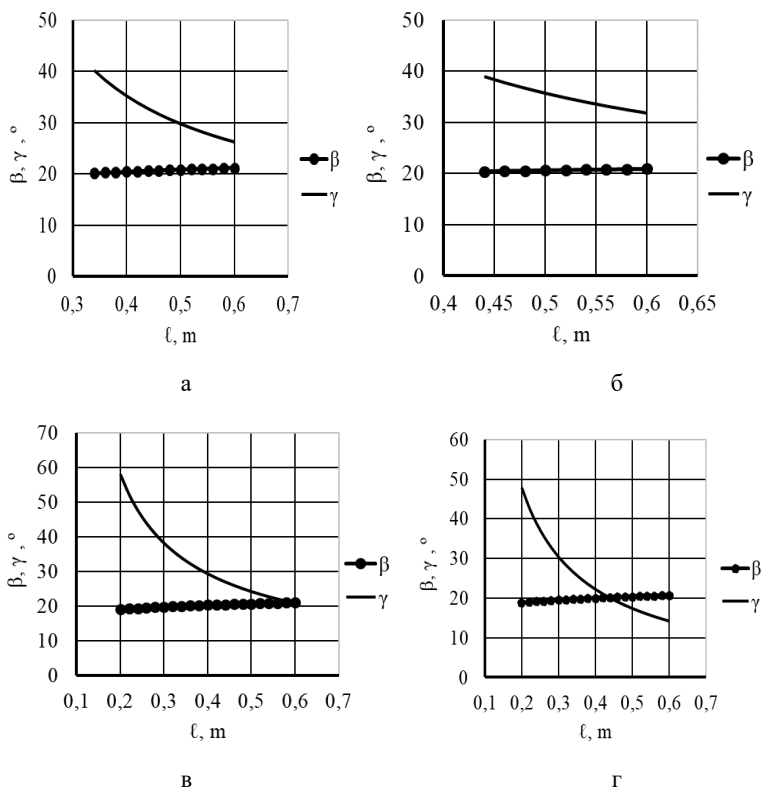
– кут нахилу полиці I гальмівної ділянки $\beta \leq \alpha$, тоді як кут нахилу полиць II гальмівної ділянки $\gamma \leq \alpha$.

В якості змінних факторів прийнятий кут нахилу α полиць розгінних ділянок та довжину полиць l . При цьому кут α змінювався в проміжку від 40^0 до 75^0 , а довжина полиць приймалась в діапазоні 0,2...0,6м.

Визначальними параметрами теоретичних досліджень були кут нахилу β нахилу полиці I гальмівної ділянки та кут γ нахилу полиці II гальмівної ділянки. При цьому аналізу піддавались ті результати, де обидва кути були меншими або дорівнювали куту нахилу розгінних полиць α . Ця умова пояснюється потребою дотримання вихідних припущень, що були прийняті при складанні аналітичної моделі.

Обрахунок визначальних кутів β та γ проводився в кілька етапів, у кожному з яких один із змінних факторів приймав сталі значення, а інший варіювався в прийнятих для нього межах.

Так, на рис.4.13,а,б,в,г приведені результати визначення кутів β та γ при зміні довжини полиць l у варіативному ряду сталих значень кута нахилу α розгінних ділянок: 40^0 , 50^0 , 60^0 та 75^0 .



а) $\alpha = 40^0$; б) $\alpha = 50^0$; в) $\alpha = 60^0$; г) $\alpha = 75^0$

Рисунок 4.13 – Залежність кутів β та γ від l та α .

На представлених графічних залежностях можна відмітити різний характер формування кутів β та γ як по тенденції своєї зміни при варіюванні довжиною полиць l , так і за числовим діапазоном своєї зміни.

Кут нахилу β першої гальмівної ділянки при збільшенні довжини полиць l для кожного сталого кута α має лінійний характер зростання. При цьому діапазон зміни кута β складає від $18,9^0$ до 21^0 для усіх варіантів кута α .

На відміну від кута β кут γ другої гальмівної ділянки характеризується своєю нелінійною зміною, подібної до гіперболічного виду, і зменшується зі зростанням довжини l . При цьому слід відмітити, що при певних кутах α кут γ уформується лише на частковому діапазоні зміни l . Зокрема, при $\alpha = 40^\circ$ кут γ перебуває в межах $31,79^\circ \dots 38,91^\circ$ при зміні довжина l від 0,44 м до 0,6 м. Це обумовлено тим, що при зменшенні l до своєї нижньої межі в 0,2 м, значення кута γ стає більшим від α . Це порушує окреслені умови співвідношення між даними кутами. Дане обмеження по куту γ також дещо корегує межі зміни кута β . Так, його мінімальне значення буде становити $20,41^\circ$ замість $18,89^\circ$.

Схожий характер обмежень для кутів β та γ спостерігається при $\alpha = 50^\circ$: кут γ змінюється лише в межах $26,22^\circ \dots 40,29^\circ$ при $l = 0,34 \dots 0,6$ м, а діапазон для β становить $20,18^\circ \dots 21,17^\circ$.

Для інших кутів α кут γ може бути знайдений для всього прийнятого проміжку l від 0,2 до 0,6 м. Наприклад, при $\alpha = 60^\circ$ кут γ варіюється від $20,84^\circ$ до $58,02^\circ$, а при $\alpha = 75^\circ$ кут $\gamma = 14,18^\circ \dots 47,90^\circ$.

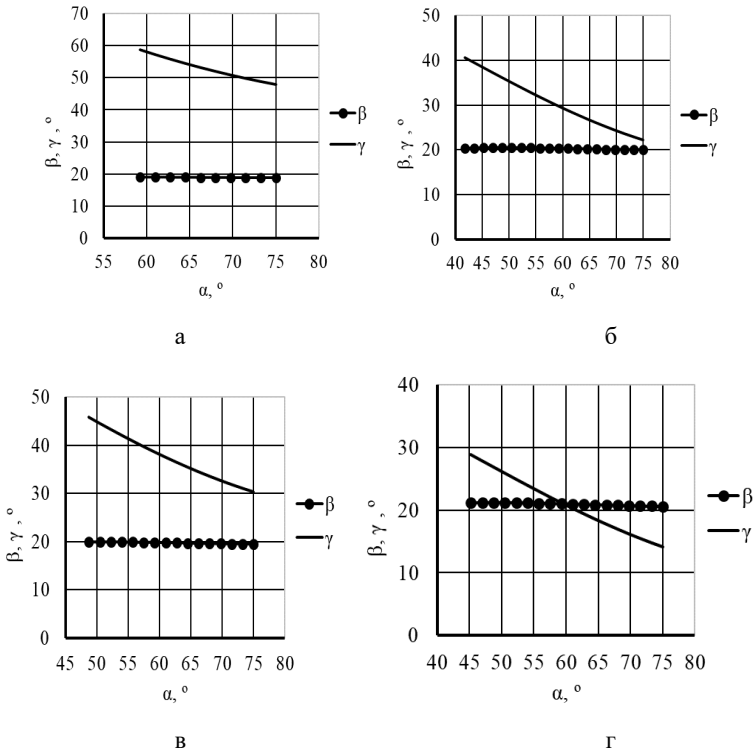
Слід також відмітити, що при $\alpha = 75^\circ$ характеристики кутів β та γ мають точку перетину, що відповідає куту 20° при довжині $l = 0,43$ м. Це дозволяє встановлювати полиці різних гальмівних ділянок під одним кутом до горизонтальної площини.

На рис.4.14,а,б,в,г приведені результати визначення кутів β та γ при зміні кута нахилу α розгінних ділянок у варіативному ряду сталих значень довжини полиць l : 0,2, 0,3, 0,4 та 0,6 м.

Для обох кутів β та γ збільшення кута α призводить до їх зменшення. При цьому характер їхньої зміни максимально наближений до лінійних залежностей, що найбільш яскраво простежується для кута γ . У свою чергу залежність кута β від α при різній довжині l представляє собою майже полого ділянку прямої, на границі якого зменшення кута β відбувається на незначну величину – $0,14^\circ \dots 0,32^\circ$. Абсолютне ж значення кута β в залежності від факторів впливу коливається від $18,75^\circ$ до $20,93^\circ$, що є значно меншим від будь-якого прийнятого кута α та повністю відповідає умові співвідношення між

цими кутами. В ситуації з кутом γ прийнята умова співвідношення з кутом α виконується лише в певному діапазоні зміни α .

Так, при $l = 0,2$ м необхідне співвідношення досягається в діапазоні зміни α від $59,25^{\circ}$ до 75° , коли γ зменшується від $58,66^{\circ}$ до $47,90^{\circ}$. Зі збільшення довжини полиць відбувається розширення меж варіювання кутів γ та α з дотриманням накладених обмежень. Для $l = 0,3$ м допустиме зменшення γ відбувається в більш широкому проміжку $45,83^{\circ} \dots 30,38^{\circ}$ при зростанні кута α від $48,75^{\circ}$ до 75° . Повна відповідність кута γ куту α в усьому проміжку його зміни простежується лише при $l = 0,6$ м. У даному випадку γ зменшується від $31,79^{\circ}$ до $14,18^{\circ}$.



а) $l = 0.2$ м; б) $l = 0.3$ м; в) $l = 0.4$ м; г) $l = 0.6$ м

Рисунок 4.14 – Залежність кутів β та γ від α та l

Також слід зазначити, що при $l = 0,6$ м графічні характеристики кутів β та γ мають спільну точку перетину при $\alpha = 60,5^{\circ}$, в якій обидва кута приймають однакове значення 21° . Це дозволяє встановлювати полиці обох розгінних ділянок під однаковим кутом до горизонтальної площини.

Приймаючи до уваги сформовані та проаналізовані характеристики зміни кутів нахилу полиць розгінних ділянок гравітаційно-каскадної установки від факторів впливу, можна стверджувати про теоретичну досяжну можливість дотримання ключової умови при використанні даної установки, а саме рівність швидкості руху зерна на вході та виході з неї тобто контрольованого руху зерна.

4.5.4. Експериментальні дослідження адекватності моделі та їх аналіз.

Спираючись на розроблену аналітичну модель та проведені теоретичні дослідження взаємозалежностей між кутами α , β та γ запропоновано дослідний зразок гравітаційно-каскадної установки з чотирма пересипними полицями. Полиці є рівної довжини, що можуть вільно повертатись на осях, закріплених в корпусі пристрою, на необхідний кут всередині пристрою відносно горизонтальної площини. Кут може бути заданий в проміжку від 0° до 90° . Величина кута контролювалась за допомогою ноніусного кутоміра УН-127. Горизонтальна площина задавалась самовирівнювальним лазерним нівеліром.

Для виготовлення полиць було вибрано листовий матеріал порізаний на однакові за довжиною частини. Довжина кожної полиці становила 0,4 м. Коефіцієнт тертя зернового матеріалу при русі по полицям приймався рівним $\mu = 0,35$, виходячи з результатів попередньо проведених трибологічних досліджень.

На запропонованій гравітаційно-каскадній установці були проведені експериментальні дослідження руху зерна по чотирьом полицям з кількома варіантами їх просторового орієнтування. Кожна полиця розташовувалась одна під одною з протилежних боків корпусу гравітаційно-каскадної установки таким чином, щоб зерно при падінні з краю однієї полиці попадала на початок

іншої. При цьому висота падіння зерна з кожної полиці становила 0,2 м. Зверху над установкою розташовувався бункер з зерном, вихідна горловина якого була на відстані 0,3 м від верхнього краю першої полиці.

Для полиць розгінних ділянок кут нахилу α вибирався з варіативного ряду 45° , 50° , 60° . Орієнтуючись на кут α , згідно аналітичної моделі полиця першої гальмівної ділянки встановлювалась під кутом $20,43^{\circ}$, $20,48^{\circ}$, $20,32^{\circ}$, а полиця другої гальмівної ділянки – $38,46^{\circ}$, $35,28^{\circ}$, $29,32^{\circ}$.

Відстеження швидкості руху зерна на виході з гравітаційно-каскадного пристрою здійснювалось шляхом фіксації часу переміщення зерна між контрольними перерізами, що знаходились на відстані 0,1 м між собою. Аналогічним чином визначалась швидкість i на вході до пристрою, але контрольною відстанню була висота розташування вихідної горловини зернового бункера. Момент появи зерна в певному перерізу визначалось за допомогою ємнісних датчиків присутності.

Дослідження проводились в три етапи. На кожному етапі кутове розташування полиць змінювалась у відповідності до сформованого варіативного ряду кутів нахилу і визначалось та порівнювалась вхідна та вихідна швидкість руху зерна. Дослідження проводились з п'ятикратною повторюваністю для кожного етапу. Результати експериментальних досліджень та їх статистична обробка наведені в табл.і 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати експериментів по визначенню швидкості руху зерна на вході та виході з гравітаційно-каскадної установки [139]

№ етапу	Кути нахилу			Результати експерименту з п'ятикратною повторюваністю кожного етапу								Теоретична швидкість	Абсолютне / відносне відхилення від теоретичної швидкості	
	α	β	γ	Середнє значення			Максимальне відхилення між значеннями		Відносне відхилення від середнього		$V_{теор}$		$V_{воч}$	$V_{кін}$
				$V_{воч}$	$V_{кін}$	Δ	$V_{воч}$	$V_{кін}$	$V_{воч}$	$V_{кін}$				
1	45	20,43	38,46	2,64	2,18	0,46	-0,21	-0,18	-8,0	-8,3	2,43	0,21 / 8,65	-0,25 / -10,31	
2	50	20,48	35,28	2,54	2,62	-0,08	-0,32	-0,34	-12,6	13,0		0,11 / 4,61	0,19 / 7,99	
3	60	20,32	29,32	2,74	2,30	0,44	-0,2	-0,21	-7,3	-9,1		0,32 / 13,02	-0,12 / -5,12	

З статичного аналізу отриманих результатів експериментальних досліджень видно, для кожного етапу початкова $V_{\text{поч}}$ та кінцева $V_{\text{кін}}$ швидкість руху зерна суттєво між собою не відрізняються. Максимальне відхилення між ними становить 0,46 м/с, а їхнє відносне відхилення від теоретично досяжної швидкості $V_{\text{теор}} = 2,43$ м/с не перевищує 13,02%.

Крім того, слід зауважити на достатньо тісні показники швидкостей в кожному з п'яти дослідів виокремленого етапу дослідження. Так, для початкової швидкості $V_{\text{поч}}$ максимальне відхилення між значеннями швидкостей спостерігається на другому етапі і становить 0,32 м/с, що у відносному вираженні дорівнює 12,6% від середнього значення на даному етапі. Для кінцевої швидкості $V_{\text{кін}}$ максимум розбіжності теж спостерігається на другому етапі, коли абсолютне відхилення становить 0,34 м/с при відносному еквіваленті до середнього значення в 13%. Для інших етапів розбіжності є дещо нижчими і не перевищують в абсолютних значеннях 0,21 м/с та відносних значеннях 9,1%. Це свідчить про належний рівень якості і повторюваності проведеного комплексу експериментальних досліджень.

Значення абсолютних та відносних похибок експериментів експериментально визначених швидкостей та теоретичного значення швидкості засвідчують цілком допустимі межі відхилень для даного багатofакторного експерименту з наявною складністю його натурної реалізації та вказує на прийнятний рівень точності приведеної аналітичної моделі.

Проведений аналіз свідчить, що представлена аналітична модель та спроектована гравітаційно-каскадна установка за рахунок гальмівних та розгінних ділянок дозволяє вирішити проблему контрольованого руху швидкості зерна для його завантаження у силоси без травмування.

Розроблена гравітаційно-каскадна установка дає можливість контролювати швидкість руху зерна за рахунок знаходження оптимальних співвідношень кутів для полиць з різними довжинами і кутами нахилу. Використання гравітаційно-каскадних пристроїв з пересипними полицями для

завантаження силосів зерном дасть можливість зменшити його травмування. Крім того такі пристрої конструктивно набагато простіші і не є метало ємними

4.6. Математичне моделювання взаємодії падаючого зерна на тороподібну поверхню

4.6.1. Загальні положення

Для зменшення компресійного ушкодження зерна в нижніх шарах насипі та інших небажаних явищ використовуються спеціальні пристрої, огляд яких наведений в першому розділі роботи. Розглянуті технічні засоби для ощадного завантаження ємностей зерном дають можливість рівномірно розподіляти зерновий вантаж по всій площі ємності.

В якості такого пристрою, котрий зменшує енергію падіння зерна з досить великої висоти, а значить і зменшується ущільнення, запропонований пристрій для обережного завантаження зерна в силос (рис.4.15). До складу пристрою входить гофрований завантажувальний рукав, він має змогу опускатись і підійматись в середині силосу за допомогою приводної станції, яка знаходиться на даху силосу. В нижній частині гофрованого рукава закріплена тороподібна тарілка з вигнутими на зовні краями, в центрі якої знаходиться конусоподібна напрямна, яка меншою своєю основою направлена до внутрішнього простору рукава, а днище торової тарілки має масив наскрізних отворів [77].

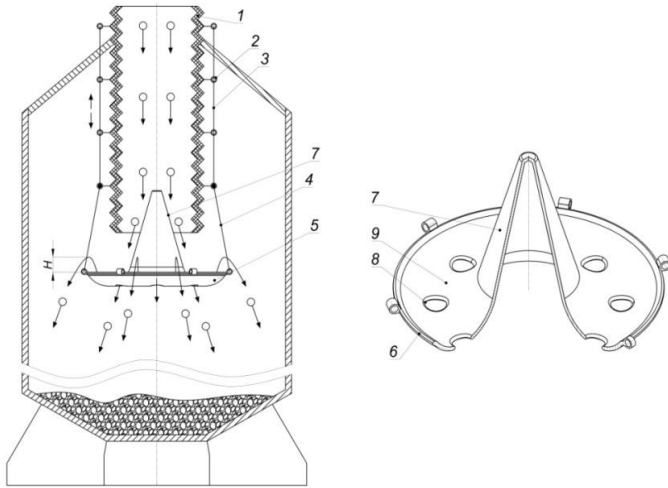


Рисунок 4.15 – Пристрій для обережного завантаження силосу зерном.

Із завантажувальної горловини зерновий вантаж попадає у гофрований завантажувальний рукав, котрий на початку завантаження знаходиться в нижній частині силосу. Зерновий вантаж під дією гравітаційної сили, не суцільним потоком, починає рухатися в середині гофрованого рукава. Дійшовши до нижньої частини зернини ударяються по конусній напрямній пристрою. При цьому вертикальний рух зерна змінює свій напрям руху, спрямовуючи його на плоске днище 9 тороподібної тарілки. Під дією дещо зменшеної гравітаційної сили зерновий вантаж сходить з тарілки по просторовим кривим. В результаті, чого зерновий вантаж рівномірно розподіляється по всій площі ємності.

Запропонований тороподібний пристрій (рис.4.15) складається з гофрованого рукава 1, на зовнішній бічній стороні якого мають ся напрямні виконані у вигляді кілець 2 з протягнутими крізь них тросами 3, котрі намотуються, або розмотуються за допомогою механічного приводу, що знаходиться на вершині силосу. За допомогою гнучких ланок 4, тороподібна тарілка 5 з'єднана з напрямними рукава 1. Тороподібна тарілка 5

оснащена вигнутими на зовні краями 6, а в центрі розміщена конусоподібна напрямна 7. На днищі тарілки по колу виконані ряд наскрізних отворів 8. Пристрій для обережного завантаження зерна в силос працює так. При потребі заповнення спустошеного силосу зерном механізмом підйому-опускання розтягують гофрований рукав по всій довжині, опускають його та тороподібну тарілку до низу силосу. Розправивши на повну довжину рукав, до його верхньої частини подають зернову масу, яка під впливом гравітаційного поля землі прямує в напрямку днища силосу. Досягаючи малої основи центральної конусоподібної прямої тороподібної тарілки зерно розподіляється і рухається у кільцевому зазорі між прямою та внутрішньою стороною рукава, при цьому величина кільцевого зазору постійно зменшується по мірі наближення зерна до більшої основи конусної прямої, що дозволяє отримати кільцевий зерновий потік невеликого поперечного перерізу.

Досягнувши тороподібної тарілки, зерно зіштовхується з його вигнутою поверхнею днища і за рахунок своєї інерції, ковзаючи по ній, вилітає з тарілки в гору на певну висоту H , гасячи таким чином зайву кінетичну енергію, надлишок якої при зіткненні з днищем силосу призвів би до травмування зерна та втрати його суцільності. Вигнуті кромки тарілки поліпшують виліт зерна, не чинячи йому зайвого опору. Частина зерна, яка не має достатньої швидкості руху для вильоту з тарілки по дотичній до його внутрішньої поверхні, просипається до низу крізь масив отворів на днищі тарілки. При цьому швидкість виходу зерна з отворів значно зменшується за рахунок багатократної контактної взаємодії зерна між собою в потоці та поверхнею днища тарілки. Це також сприяє зменшенню ударної сили зерна об днище і стіну самого силосу. При такому завантаженні зерновий вантаж буде рівномірно розподілятися по всій площі силосу. Рівномірне розподілення зерна по всій площі силосу сприяє зменшенню тисків та сегрегації, що значно зменшує компресійне ушкодження зерна. В цьому пристрою за допомогою гнучких ланок можна регулювати кільцевий зазор між конусоподібною прямою та внутрішньою стороною рухомого рукава.

4.6.2. Математичне моделювання руху зерна по робочій поверхні тороподібного пристрою

Відомо, що крімкомпресійного ушкодження зерна в нижніх шарах насипі при гравітаційному завантаженні виникає не бажане явище таке як сегрегація. Сегрегація в силосах виникає в результаті нерівномірного розподілення сипкого матеріалу, який відрізняється між собою по величині, формі і щільності. Сегрегація зернового матеріалу спостерігається як на стадії вільного падіння зерна, так і на поверхні зернового насипу, внаслідок скочування великих і важких зернівок до стінок силосної ємності. Це явище приводить до зниженню міцності силосного бункера [105,123].

На рівень сегрегації зернового матеріалу в силосних спорудах основний вплив має дальність польоту їх зернівок, яка в свою чергу залежить від фізико-механічних властивостей завантажувального зерна. На результати робочого процесу завантаження, особливо на першому етапі, мають вплив такі фізико-механічні властивості зерна як об'ємна маса, парусність, сипучість, вологість щільність, питома вага, пружність. Але головними чинниками, котрі впливають на рівномірність заповнення циліндричних ємностей зерновим матеріалом є об'ємна маса, парусність та пружність зерна. Пояснюється це тим, що при падінні зернового матеріалу на дно силосної споруди різні за розмірами та щільністю зернівки отримують однакову скидальну швидкість, але різні значення кінетичної енергії, а в стадії гравітаційного польоту – різний опір повітря. Кінетична енергія зернівок з яких складається завантажувальний матеріал, та їх дальність польоту в основному залежить від розмірів та маси частинок ніж від опору повітря [77]. Для усунення сегрегації в силосах необхідно використовувати спеціальні пристрої, котрі б рівномірно розподіляли зерновий вантаж по всьому периметру ємності.

На рис.4.16 схематично показано принцип роботи тороподібного пристрою. В подальшому необхідно визначити координати падіння зерна на дно силосу. Рух зерна до падіння на дно силосу можна розділити та три

самостійні ділянки. Перша ділянка відповідає вільному падінню зерна із завантажувальної горловини до контакту його з конусоподібною поверхнею.

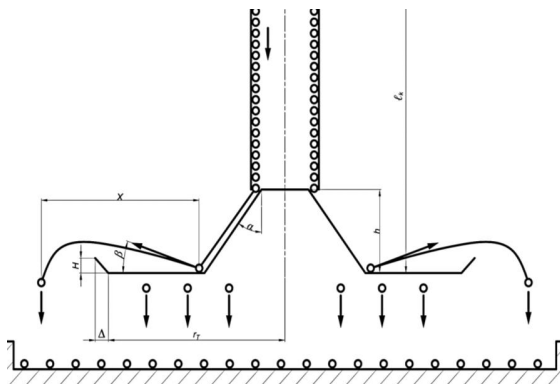


Рисунок 4.16 – Схема руху зернового вантажу в пристрої для обережного завантаження силосу зерном

На рис.4.17 показано рух зерна в середині гофрованого рукава (перша ділянка) із точки А до точки В (вільне падіння зернового матеріалу у рукаві).

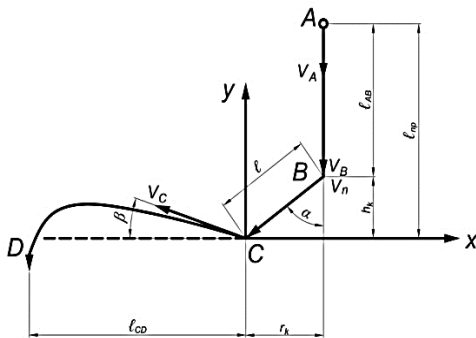


Рисунок 4.17 – Схема зміни напрямків руху зернового вантажу в пристрої для обережного завантаження силосу зерном

Починаючи з точки А, зерновий вантаж вільно падає з початковою швидкістю v_A . Проходячи відстань АВ зерновий вантаж рухається не суцільним

потоком, а у вигляді сукупності окремих зернових частинок. Швидкість падіння окремих зернин в момент їх зіткнення з конусоподібною поверхнею збільшується і в точці В стає рівною v_B . Шлях(l_{AB}) пройдений окремими зернинами в середині гофрованого рукава в рівноприскореному русі до зіткнення із поверхнею прямого конуса буде [121]:

$$\ell_{AB} = v_A \cdot t + \frac{g \cdot t^2}{2}. \quad (4.76)$$

Час за який зернина пройде відстань ℓ_{AB} буде дорівнювати:

$$t = \left(-v_A + \sqrt{V_A^2 + 2 \cdot g \cdot \ell_{AB}} \right) \cdot g^{-1}. \quad (4.77)$$

Підставивши (4.77) в рівняння швидкості рівноприскореного руху, отримаємо швидкість зерна в точці В, яка відповідає вершині тороподібної тарілки:

$$v_B = \sqrt{V_A^2 + 2 \cdot g \cdot \ell_{AB}}. \quad (4.78)$$

Зіткнення зернового потоку з боковою поверхнею конуса є не пружним, тоді швидкість в точці В змінюється як по величині так і по напрямку. Вона стає швидкістю ковзання, тоді початкова швидкість на вершині конуса пристрою буде визначатись за формулою:

$$v_n = v_B \cdot \cos \alpha = \sqrt{V_A^2 + 2 \cdot g \cdot \ell_{AB}} \cdot \cos \alpha. \quad (4.79)$$

На ділянці ВС зерновий вантаж пройшовши кільцевий зазор між гофрованим рукавом і боковою поверхнею конуса утворює відносно структурований не великий, а по товщині зерновий потік. Попавши на бокову поверхню конуса окремі зернівки починають здійснювати галоупуючий рух, тобто ударяться одне з одним та контактувати із зерновим шаром. За рахунок безлічі одночасних зіткнень зернових часток відбувається демпфірування руху цих частинок по боковій поверхні конуса.

Використавши теорему про зміну кінетичної енергії, була визначена швидкість руху зернового вантажу в точці Стороподібної тарілки:

$$\frac{q}{2} \cdot (V_c^2 - V_n^2) = A_p - A_0, \quad (4.80)$$

де q – подача зернового матеріалу на бокову поверхню конуса;

A_p – робота рушійних сил, тобто робота сил тяжіння;

A_0 – робота сил тертя.

$$\begin{cases} A_p = q \cdot g \cdot h_k \\ A_0 = q \cdot g \cdot l_{BC} \cdot f_T \cdot \sin \alpha \end{cases}$$

де h_k – висота конуса;

g – прискорення вільного падіння;

l_{BC} – довжина твірної конуса;

α – кут при вершині конуса;

f_T – коефіцієнт тертя зернового вантажу об поверхню конуса.

Підставивши A_p і A_0 у формулу (4.80), отримуємо:

$$\frac{q}{2} \cdot (V_c^2 - V_n^2) = q \cdot g \cdot h_k - q \cdot g \cdot l_{BC} \cdot f_T \cdot \sin \alpha, \quad (4.81)$$

або

$$V_c^2 = 0,5 \cdot V_n^2 + g \cdot h_k - g \cdot l_{BC} \cdot f_T \cdot \sin \alpha. \quad (4.82)$$

Третій член правої частини рівняння помножимо і поділимо на $\cos \alpha$ і враховуючи, що $h_k = l_{BC} \cdot \cos \alpha$ отримаємо:

$$V_c = \sqrt{0,5 \cdot V_n^2 + g \cdot h_k - g \cdot h_k \cdot f_T \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (4.83)$$

Підставивши (4.79) в (4.83) отримаємо кінцеву швидкість в точці С:

$$V_c = \sqrt{0,5 \cdot V_A^2 \cdot \cos^2 \alpha + g \cdot l_{AB} \cdot \cos^2 \alpha - g \cdot h_k \cdot f_T \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (4.84)$$

Враховуючи, що $l_{AB} = l_{np} - h_k$ формула (484) в кінцевому вигляді буде мати такий вигляд:

$$V_c = \sqrt{0,5 \cdot V_A^2 \cdot \cos^2 \alpha + g \cdot (l_{np} - h_k) \cdot \cos^2 \alpha - g \cdot h_k \cdot f_T \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (4.85)$$

де l_{np} – довжина гофрованого рукава з'єднаного з тороподібною тарілкою.

На ділянці СД зерновий потік ударяючись об дно тарілки перетворюється в хаотичний рух окремих частинок кинутих під кутом β до горизонту. Зерно після удару рухатиметься по просторовій кривій. Під час польоту на нього діє сила ваги G . Важчі зернини вилетять із тарілки, а легші впадуть на дно тарілки і просіюються через її отвори на дно ємності.

На ділянці СД зерновий матеріал сходить із тороподібною тарілки під кутом β і падає на дно силосу. Склавши диференціальні рівняння руху зернини

в плоскій системі координат на цій ділянці (сили опору повітря не враховувались), був визначений час і координати падіння зерна на дно силосу.

$$m\ddot{x} = 0; m\ddot{y} = -\sigma \quad (4.86)$$

Після перетворень та інтегрування отримаємо:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= 0; \dot{x} = C_1; x = C_1 \cdot t + C_2 \\ \ddot{y} &= -q; \dot{y} = -q \cdot t + C_3; y = -\frac{q \cdot t^2}{2} + C_3 \cdot t + C_4. \end{aligned} \quad (4.87)$$

Визначимо сталі інтегрування:

$$\begin{aligned} t = 0; x = y = 0; C_2 = C_4 = 0; \\ t = 0; \dot{x} = v_c \cdot \cos \beta; C_1 = v_c \cdot \cos \alpha; \\ t = 0; \dot{y} = v_c \cdot \sin \beta; C_3 = v_c \cdot \sin \alpha. \end{aligned}$$

Підставивши початкову швидкість та сталі інтегрування у рівняння руху отримаємо:

$$\begin{cases} x = t \cdot \sqrt{0,5 \cdot V_A^2 \cdot \cos^2 \alpha + g \cdot (l_{np} - h_k) \cdot \cos^2 \alpha - g \cdot h_k \cdot f_T \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \beta} \\ y = -\frac{g \cdot t^2}{2} + t \cdot \sqrt{0,5 \cdot V_A^2 \cdot \cos^2 \alpha + g \cdot (l_{np} - h_k) \cdot \cos^2 \alpha - g \cdot h_k \cdot f_T \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \beta} \end{cases}. \quad (4.88)$$

Визначимо час падіння зерна на дно ємності. Коли зернина досягне дна координату $y = 0$.

$$t = \frac{2 \cdot \cos \beta \cdot \sqrt{0,5 \cdot V_A^2 \cdot \cos^2 \alpha + g \cdot (l_{np} - h_k) \cdot \cos^2 \alpha - g \cdot h_k \cdot f_T \cdot \operatorname{tg} \alpha}}{g}. \quad (4.89)$$

Підставивши (4.89) в (4.88) одержимо координату Д:

$$x = l_{CD} = \frac{2 \cdot (0,5 \cdot V_A^2 \cdot \cos^2 \alpha + g \cdot (l_{np} - h_k) \cdot \cos^2 \alpha - g \cdot h_k \cdot f_T \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot \cos \beta}{g}. \quad (4.90)$$

Отримана формула вказує на те, що за допомогою тороподібної тарілки можна рівномірно розкидати зерновий вантаж по всьому периметрі силосу.

4.6.3. Лабораторна установка для дослідження рівномірного розподілення падаючого зерна у циліндричну ємність

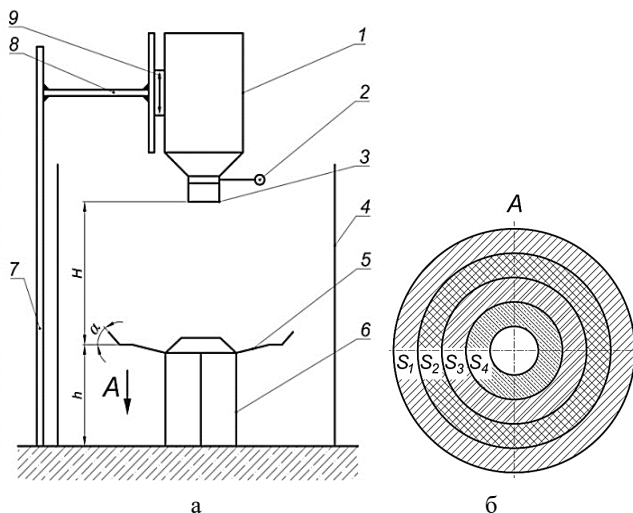
Негативні наслідки нерівномірного розподілення зернового матеріалу по всій площі ємності проявляється як в процесі завантаження так і при

розвантаженні силосних бункерів. Крім того розшарування зернового матеріалу в середині циліндричного бункера приводить до утворення склепін, які суттєво впливають на вивантаження зерна із ємності. Підвищена неоднорідність сипкого зернового матеріалу внаслідок сегрегації знижує технологічну придатність і споживчу вартість зерна [77,124].

Під час вільного падіння у середині силосної споруди зерновий матеріал розділяється на пилову і зернову частини. Пилова частина стає джерелом забруднення повітря, що являється згубним явищем для здоров'я людей які працюють на елеваторних підприємствах.

Для дослідження характеру розподілення падаючого із заданої висоти зернового матеріалу на плоске дно циліндричної ємності розроблена лабораторна установка, яка зображена на рис.4.18.

Вихідним зерновим матеріалом слугувало зерно озимої пшениці.



а) дослідна установка; б) кільцеві області на бетонному дні установки.

Рисунок 4.18–Лабораторна установка з тороподібною тарілкою

Лабораторна установка (рис.4.18,а) складається із бункера 1, засува 2, вихідного патрубку 3, циліндричної ємності 4, тороподібної тарілки 5, установочної платформи 6, стояка вертикального 7, квадратної труби 8, механізму підйому та опускання бункера 9. Циліндрична ємність 4 в масштабі імітує силос для зберігання зерна висотою 24м і діаметром 16м. Лабораторна установка має висоту 1,2м, а її діаметр рівний 0,8м. На бетонному дні циліндричної ємності кольоровою крейдою нанесені чотири концентричні кола (рис.4.18,б) відповідно діаметрами: 0,7м, 0,6м, 0,5м і 0,4м. Ці кола утворили чотири кільцеві області S_1 , S_2 , S_3 і S_4 . Край тороподібної тарілки, яка має діаметр 0,16 м, вигнутий під кутом α до горизонту. В дослідях використовували три різні тарілки з кутами: $\alpha = 18^{\circ}24'$; $\alpha = 15^{\circ}23'$; $\alpha = 12^{\circ}51'$. Тороподібна тарілка встановлюється по центру бетонного дна установки на установочній платформі 5. Висота від бетонного дна до тороподібної тарілки h не змінна і дорівнює 300 мм. На пристрій для обережного завантаження зерна в силос був отриманий патент на корисну модель за номером UA 15628 U[140].

Працює лабораторна установка так, в бункер 1 завантажуються попередньо зважений на електронних вагах зерновий матеріал. За допомогою механізму підйому та опускання встановлюється висота H з якої зерновий матеріал під дією гравітаційної сили падає на тороподібну тарілку, а з неї на бетонне дно ємності. Падаючи на тороподібну тарілку зерно торкаючись її вигнутої поверхні і за рахунок своєї інерції, ковзаючи по ній, вилітає з тарілки в гору, гасячи таким чином зайву кінетичну енергію. В залежності від отриманої швидкості і маси зернівок, відбувається розподілення зернового матеріалу по круговій поверхні бетонного дна лабораторної установки. Зернівки які мають найменшу швидкість падають на кругову поверхню ближче до центра, а зернівки які мають більшу швидкість падають даліше центра ємності. Після завершення дослідів, на встановленій висоті H , вміст зерна на чотирьох кругових поверхнях збирався в окремі чашки. Вміст зерна в чашках по черзі зважується і визначається функція щільності розподілення зернового матеріалу.

Кількість необхідного числа повторності дослідів при вибраному куту α і висоті H визначали за формулою [125,126]:

$$n = \frac{t^2 \cdot G^2}{(\Delta_{\text{від}} \cdot \bar{x})^2}, \quad (4.91)$$

де t – критерій Стюдента;

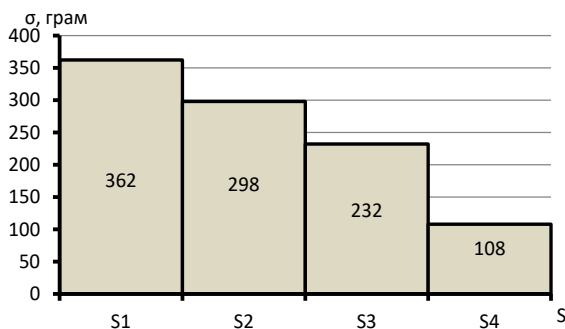
G^2 – дисперсія генеральної сукупності величини часу витікання зерна із бункера;

$\Delta_{\text{від}}$ – задана відносна похибка;

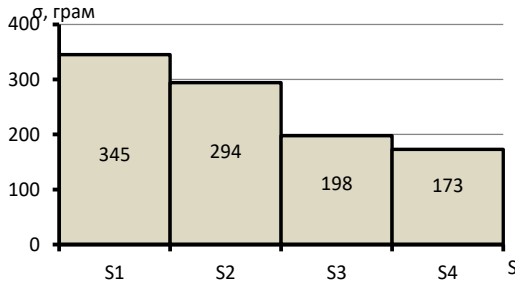
\bar{x} – середня арифметична величина часу витікання сипкого зернового матеріалу по результатам пробних дослідів.

4.6.4. Результати експериментальних досліджень

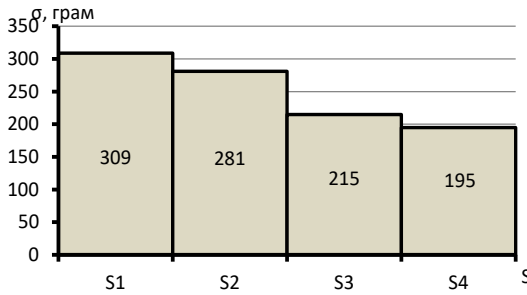
В дослідях використовувались три тороподібні тарілки, вершини яких спрямовані вниз. На рис. 4.19 і 4.20 приведені гістограми, які вказують на характер розподілення зернового матеріалу по дну лабораторної установки з використанням демпферних тороподібних тарілок, які мають три різних кута нахилу твірної до горизонту. Скидання зерна для даних тарілок проводились із двох висот 1,0 м, 1,4 м відповідно.



а) $\alpha=18^\circ$; $H = 1,0$ м



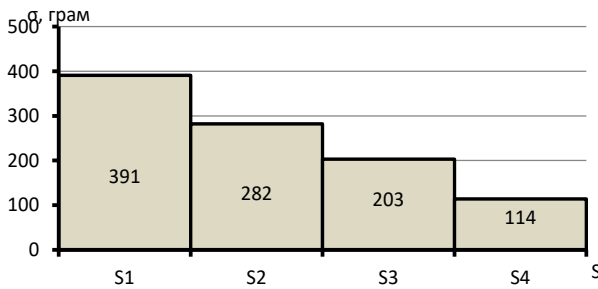
б) $\alpha=15^{\circ}$; $H = 1,0$ м



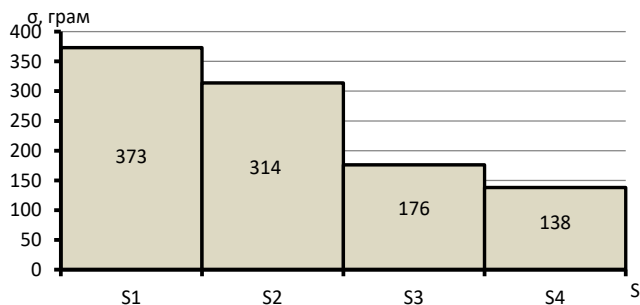
в) $\alpha=12^{\circ}$; $H = 1,0$ м

а – кут нахилу твірної до горизонту 18° ; б – кут нахилу твірної до горизонту 15° ;
в – кут нахилу твірної до горизонту 12° .

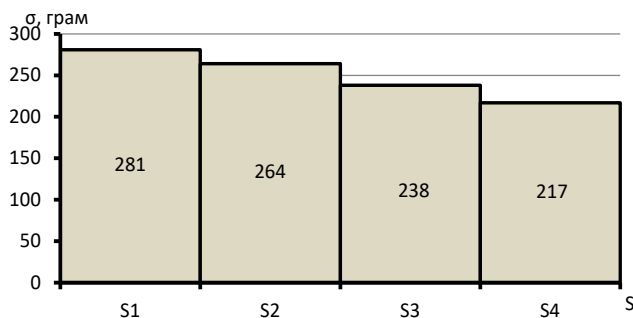
Рисунок 4.19 – Гістограми розподілення зернового матеріалу по дну циліндричної ємності при скиданні його з висоти 1 м



а) $\alpha = 18^{\circ}$; $H = 1,4$ м



б) $\alpha = 15^\circ; H = 1,4 \text{ м}$



в) $\alpha = 12^\circ; H = 1,4 \text{ м}$

Рисунок 4.20 – Гістограми розподілення зернового матеріалу по дну циліндричної ємності при скиданні його з висоти 1,4 м

Під час взаємодії падаючого зернового матеріалу з робочою поверхнею тороподібної тарілки відбувається зміна лінійної швидкості зерна по величині і напрямку при його падіння на бетонне дно лабораторної установки.

На рис.4.19,а,б,в представлені гістограми розподілення зернового матеріалу по дну ємності в залежності від трьох кутів нахилу твірної тарілки до горизонту. Зерновий матеріал скидався з висоти 1,0 м.

З представлених гістограм видно, що кут нахилу твірної суттєво впливає на характер розподілення зернового матеріалу по дну ємності. При куту $\alpha = 12^\circ$ спостерігається найбільш рівномірне розподілення зернового матеріалу по всій площі ємності.

На рис.4.20,а,б,в приведені гістограми розподілення зернового матеріалу при його скиданні з висоти 1,4 м. Падаючи з цієї висоти на тарілки з трьома різними кутами нахилу твірної тарілки до горизонту, встановлено, що найкраще розподілення зернового матеріалу по всій площі ємності при куту $\alpha = 12^{\circ}$. Крім того виявлено, що при збільшенні кута α росте і таке явище як сегрегація зернового матеріалу у досліджуемій ємності.

Результати розподілення зернового матеріалу по дну лабораторної установки наведені на рис.4.21–4.23.

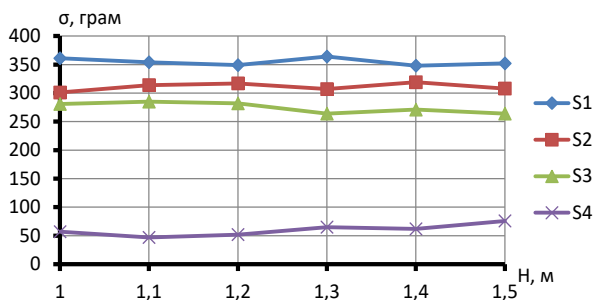


Рисунок 4.21–Залежність розподілення падаючого з різної висоти зерна озимої пшениці по дну циліндричної ємності для тороподібної тарілки з кутом нахилу твірної до горизонту 18° на кільцевій площини S_1, S_2, S_3 і S_4

Із графіка видно, що падаючий зерновий матеріал по різному розподіляється по круговим площинам. Так при скиданні зерна з висоти 1,5 м на S_1 виявилось 324 грам зерна, на S_2 – 264 грам, на S_3 – 217 грам і на S_4 – 195 грам відповідно. Приблизно така ж тенденція розподілення зерна пшениці спостерігається і при інших висотах скидання.

На рис.4.22 представлені графіки розподілення зерна озимої пшениці яке скидалась на дно циліндричної ємності з використанням тороподібної тарілки із кутом нахилу твірної до горизонту 15° .

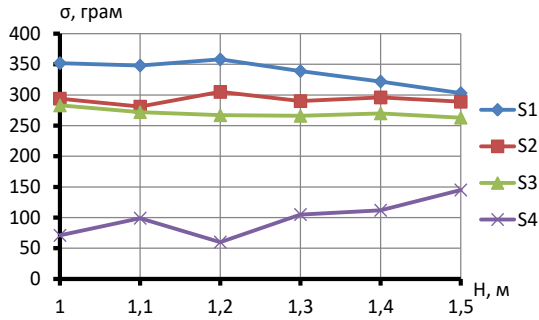


Рисунок 4.22– Залежність розподілення падаючого з різної висоти зерна озимої пшениці по дну циліндричної ємності для тороподібної тарілки з кутом нахилу твірної до горизонту 15° на кільцевіплощини S_1, S_2, S_3 і S_4 .

З рис. 4.22 видно, що при скиданні зерна пшениці з висоти 1,5м щільність розподілення дещо різниться під попереднього досліді. Так на S_1 було виявили 303 грам зерна, на S_2 – 289 грам, на S_3 – 263 грам,а на S_4 – 145 грам.

На рис.4.23 представлені графіки розподілення зерна озимої пшениці яке скидалась на дно циліндричної ємності з використанням тороподібної тарілки із кутом нахилу твірної до горизонту 12° .

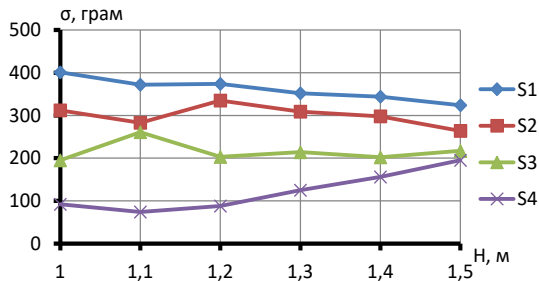


Рисунок 4.23– Залежність розподілення падаючого з різної висоти зерна озимої пшениці по дну циліндричної ємності для тороподібної тарілки з кутом нахилу твірної до горизонту 12° на кільцевіплощини S_1, S_2, S_3 і S_4

З рис. 4.23 видно, що при скиданні зерна пшениці з висоти 1,5м спостерігається більш менш рівномірне розподілення зернового матеріалу по всій площі ємності. Так при скиданні зерна озимої пшениці з висоти 1,5м на S_1 виявили 324 грам зерна, на S_2 – 284 грам, на S_3 – 217 грам і на S_4 – 195 грам.

З проведених досліджень видно, що розподілення зернового матеріалу по дну циліндричної ємності з використанням тороподібної тарілки залежить в першу чергу від висоти скидання зерна і від кута нахилу твірної тороподібної тарілки до горизонту. Найкраще розподілення зерна по дну циліндричної ємності відбувається при використанні тороподібної тарілки з кутом нахилу твірної до горизонту 12^0 , але при цьому висота скидання повинна перевищувати 1,5м. При скиданні зерна озимої пшениці з використанням тарілки із кутом нахилу твірної до горизонту 15^0 і 18^0 , спостерігається рівномірне розподілення зерна на кільцевих площинах S_1 , S_2 і S_3 . Такі дослідження дають можливість виробникам правильно встановлювати гальмуючі пристрої, котрі зменшують травмування зерна і його сегрегацію.

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ СИЛОСІВ ЗЕРНОВИМ МАТЕРІАЛОМ

5.1. Способи завантаження силосів сипким зерновим вантажем

5.1.1. Поведінка сипкого зернового вантажу під час завантаження його в силоси

При дослідженні функціонування силосних сховищ, котрі встановлюються на сучасних елеваторах, необхідно звернути особливу увагу на розробку та конструювання пристроїв за допомогою яких зерновий вантаж доставляється до центрального отвору силосів, скидається у циліндричні ємності і вивантажується із них. На всіх етапах доставки і вивантаження зернового вантажу існують певні проблеми, котрі пов'язані із травмуванням зернівок вантажу та утворенню зводів які перешкоджають вільному витіканню зерна із силосів.

Основні труднощі при експлуатації ємностей для безтварного зберігання зернового вантажу виникають, як правило, при випускі вантажу із ємності. Під впливом різних факторів, які діють на цей процес, випуск вантажу із ємності стає нестабільним і може повністю зупинитися. Подібні явища обумовлюються наступними причинами [73,78]:

- утворенню статичних і динамічних зводів над випускним отвором силосу;
- в процесі випуску зерновий вантаж може прилипати до стінок силосу, утворюючи на них застійні зони по всій висоті ємності;
- ущільнюючий тиск який виникає при завантаженні висотних ємностей, приводить до виникнення стрибкоподібного збільшення тиску в нижній частині ємності в початковий момент випуску зерна.

Відомо, що на стабільність функціонування циліндричних ємностей, особливо висотних, впливають як внутрішні так і зовнішні фактори. До внутрішніх факторів відносяться фізико-механічні і біологічні властивості сипкого зернового матеріалу, а до зовнішніх – умови навколишнього

середовища, конструктивно-технологічні параметри ємностей та допоміжні пристрої, які встановлені на них.

Головним фактором, котрий впливає на процес функціонування силосів, є сипкість вантажу. Сипкість вантажу класифікують по фракційному складу і формою. Наявність у зерновому вантажу зернівок ниткоподібної, гольчастої, пластівцеподібної та пластичної форми сприяє хорошему механічному зчеплюванню зернівок між собою, що веде до погіршення сипкості зернового вантажу.

Волога також істотно впливає на пливність сипких вантажів. Зі збільшенням вологості між частинками утворюються «рідинні містки», які посилюють сили зчеплення (когезію) та зростають капілярні сили. Це призводить до грудкування матеріалу та погіршенню його здатності вільно переміщатись. Для дрібнозернистих вантажів існує критична межа вологості. Найбільш важкосипучими (когезійними) зерновими вантажами, являються вантажі з вологістю понад 15...17%. В цьому випадку зернова маса втрачає сипучість через збільшення сил зчеплення між зернами [128].

Способи і режими завантаження силосів зерновим матеріалом суттєво впливають на процеси зберігання і випуск зерна, а також на сам оброблюваний продукт. Для забезпечення не травмованого способу завантаження силосів сипким зерновим матеріалом необхідно використовувати спеціальні гальмівні пристрої, основна частина яких була розглянута в другому розділі.

Відомо, що під час роботи завантажувальних пристроїв, сипкий вантаж взаємодіє з робочими органами самого пристрою. Подібна взаємодія зустрічається при роботі різних сільськогосподарських машин. Результати досліджень цих взаємодій можуть бути примінені при проектуванні як самих завантажувальних пристроїв так і транспортних магістралей, котрі призначені для доставки сипкого матеріалу до центрального отвору силосу.

При дослідженні поведінки сипучого вантажу і його взаємодію з різними металевими і не металевими поверхнями, вантаж в подальшому розглядається як безперервне сипуче тіло (континуум), або як сукупність окремих

матеріальних точок. Як правило, сипкий вантаж, що перебуває в замкнутій ємності, представляється у вигляді безперервного сипучого тіла, що знаходиться у вільному падінні як сукупність окремих зернівок [73].

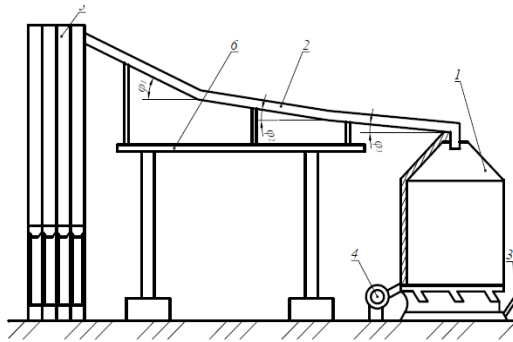
5.1.2. Іноваційні методи завантаження і розвантаження силосів зерновим матеріалом

На рис.5.1 зображена схема елеватора, в якому силос завантажується за допомогою гравітаційної установки. Основні складові такого елеватора – силос 1, гравітаційно-завантажувальна установка 2, підсилосний стрічковий транспортер 3, обладнання для активного вентилявання 4, робоча вежа 5, підтримуюча каскадна металева конструкція, яка необхідна для утримання гравітаційної установки 6. В робочій вежі розміщені: норії, ваги, зерноочисні машини, самопливне і аспіраційне обладнання та інше устаткування.

Елеватор працює наступним чином. Зерновий вантаж із робочої вежі потрапляє на розгінну ділянку гравітаційної установки, яка нахилена під кутом φ_1 до горизонту. На цій ділянці зерновий вантаж розганяється до максимальної швидкості ϑ_{\max} і з цієї швидкістю він потрапляє на першу гальмівну ділянку, яка нахилена під кутом φ_2 до горизонту. Пройшовши другу ділянку швидкість зернового вантажу зменшується на 10...15% від ϑ_{\max} . На другу гальмівну ділянку, яка нахилена під кутом φ_3 до горизонту, зерновий вантаж надходить із зменшеною лінійною швидкістю, котра поступово зменшується. При підході зернового вантажу до центрального отвору силосу лінійна швидкість відповідає стандартній величині.

Даний спосіб завантаження виключає використання стрічкових транспортерів по доставці зерна до центрального отвору силосу, внаслідок чого зерно не травмується на цій ділянці.

Для покращення вивантаження сипучого матеріалу із силосу та усунення таких явищ як застійні зони зарубіжні винахідники [127] запропонували конструкцію силосу, який складається із однієї або декількох силосних комірок розташованих суміжно одна до одної, з утворенням силосного комплексу.



- 1 – металевий силос; 2 – гравітаційна завантажувальна установка;
 3 – підсилований стрічковий транспортер; 4 – вентилятор; 5 – робоча вежа;
 6 – каскадна підтримуюча металева конструкція.

Рисунок 5.1 – Елеватор обладнаний завантажувальною установкою гравітаційного типу.

Кожна силосна комірка містить корпусну частину, яка утворює основний об'єм для збереження сипучого матеріалу. Корпусна частина, такої конструкції, має прямокутний поперечний переріз і вона обмежена вертикальними внутрішніми стінками. В нижній частині корпуса розташована бункерна частина, яка з'єднує корпусну частину з випуклим отвором. Бункерна частина має перехідну воронку, яка забезпечує поступову зміну поперечного перерізу внутрішнього простору ємності комірки від поперечного перерізу корпусної частини до поперечного перерізу випускного отвору.

Дана конструкція силосу передбачає перехідну воронку, яка утворюється множинною перехідних елементів, котрі виконуються у вигляді плоских або криволінійних пластин. Таке виконання забезпечує плавний перехід між різними геометричними формами та сприяє рівномірному самопливу сипучого матеріалу при його вивантаженні із силосу [127].

Для зменшення травмування зерна, яке надходить на зберігання у силосні споруди ВАТ Лубнимаш, пропонує встановлювати в середині силосів

спеціальні каскадні пристрої або «сходинки», які призначені для поступового сповільнення падіння зерна з великої висоти запобігаючи при цьому його ударам об дно або стінки. На рис.5.2 зображений силос котрий обладнаний пристроєм каскадного типу.

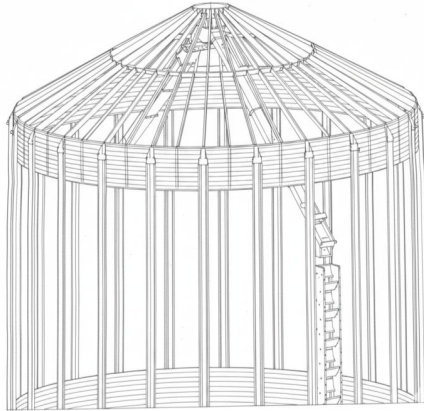


Рисунок 5.2 – Виставковий варіант силосу ВАТ Лубнимаш.

В силосі ВАТ Лубнимаш у верхній частині встановлюється клапан, який має дві позиції на відкриття. Перша позиція – відкривається отвір з якого зернова маса надходить вниз по каскадному пристрою на дно ємності. Після заповнення нижньої частини силосу зерном клапан першої позиції закривається, а клапан другої позиції відкривається і зерновий вантаж вільно падає вниз на уже утворений насип.

До інноваційного методу завантаження силосів зерновим матеріалом можна віднести механічний завантажувальний рукав який запропонували винахідники Іванов О.М., та Арендаренка В.М. Запропонована конструктивна розробка відноситься до допоміжних засобів завантаження зерна в силосні або бункерні споруди і призначена для забезпечення зерна від надмірного пошкоджень при його зіткненні з жорсткими поверхнями ємності зберігання та з нерухомим зерновим насипом.

Принципіальна схема механічного завантажувального рукава приведена на рис. 5.3.

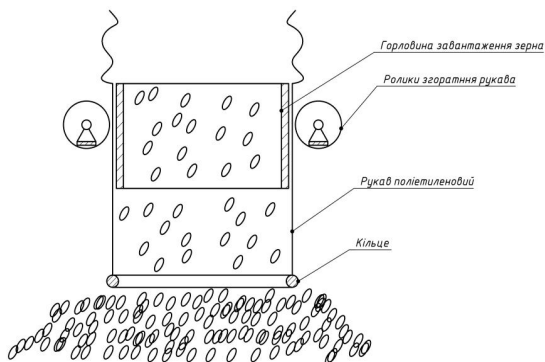


Рисунок 5.3 – Принципіальна схема механічного завантажувального рукава

Основними складовими рукава є поліетиленова оболонка, обтяжливе кільце та привідні ролики згортання. Поліетиленова оболонка рукава насунута на циліндричну горловину завантажувального тракту бункерної ємності, по якій зерно падає у внутрішній простір ємності. Обтяжливе кільце закріплено внизу поліетиленової оболонки рукава для створення правильної форми вихідного перерізу рукава та уникнення його зминання та заплутування. Також обтяжливе кільце виконує функцію вантажу, що сприяє безпровідному опусканню оболонки рукава вертикально донизу лише під власною вагою.

Привідні ролики рукава змонтовані на рівні завантажувальної горловини і своїми бічними поверхнями притискають поліетиленову оболонку до горловини. При обертанні роликів поліетиленова оболонка здійснює лінійне переміщення вздовж горловини. При русі вгору поліетиленова оболонка у верхній своїй частині зминається та скупчується біля горловини. Синхронне обертання роликів у взаємно протилежних напрямках задається механізмом згортання, що керується ззовні.

Кінематична схема механізму згортання відображена на рис. 5.4.

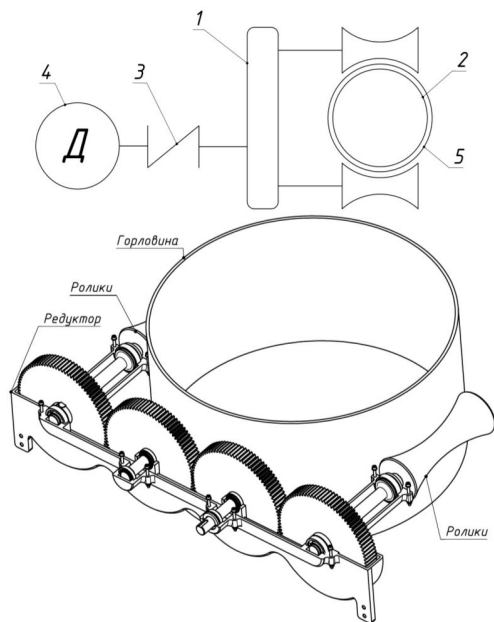


Рисунок 5.4 – Механізм згортання рукава.

Привідний механізм містить сервопривід 4 у складі електро керованого електродвигуна та перетворювального редуктора. Сервопривід 4 за допомогою муфти 3 поєднується з привідним валом механізму згортання (редуктор) 1, що приводить в обертовий рух ролики, які у свою чергу контактують з поліетиленовою оболонкою 5 завантажувальної горловини 2.

Механізм згортання рукава виконаний у формі зубчастого одноступінчастого циліндричного редуктора з двома вихідними валами, на яких закріплені прижимні ролики. Частота обертання валів роликів відповідає частоті сервоприводу, але при цьому напрямок обертання валів є взаємно протилежним.

Принцип роботи механічного завантажувального рукава. У вихідному положенні рукав згорнутий вгору та піднятий в положення, коли обтяжливе кільце перебуває в області завантажувальної горловини.

При необхідності завантаження зерна приводиться в дію сервопривід, який через механізм згортання прокручує з заданою частотою ролики, які примушують поліетиленову оболонку рухатися донизу. При цьому обтяжливе кільце під впливом сили тяжіння витягує оболонку, випрямляючи її та формуючи правильну циліндричну форму даної оболонки.

При досягненні дна бункерної ємності сервопривід припиняє обертання роликів і рух оболонки зупиняється.

За допомогою штатної системи подачі зернова маса спрямовується до центрального отвору силосу та у внутрішній простір оболонки, потрапляє до бункерної ємності. По мірі насипання зерна в оболонку, її об'єм поступово заповнюється зерном, при цьому в нижній частині оболонки не відбувається його вивантаження в бункер із-за вже накопиченого внизу зерна. Тим самим формується зерновий стовп по висоті поліетиленової оболонки.

По досягненні певної висоти зернового стовпа сервопривід приводить в рух ролики в напрямку, що спричиняє рух оболонки вгору. Переміщення оболонки вивільняє в нижній частині вільний простір, в який спрямовується зерна з оболонки. Зерно рівномірно сповзає та рівномірно розсипається по накопиченому зерновому об'єму без суттєвих механічних пошкоджень.

Підняття вгору оболонки триває до моменту виходу її у висхідне положення біля горловини.

5.2. Рух зернового вантажу по похилому лотку гравітаційної установки

Вивченням руху матеріальної точки займались Галілей, Нютон, Ейлер та інші вчені класичної механіки. Подальший розвиток теорії руху стосовно завдань сільськогосподарського машинобудування відображено в працях таких вчених, як П.М. Василенка [129], П.М. Заїки [14] та інших. В роботі [130,131] представлений узагальнений матеріал, накопичений з цього питання, наведені прийоми рішення нових задач з теорії руху матеріальних частинок.

Якщо рух матеріальної точки вагою G відбувається ковзанням з

коефіцієнтом тертя f_T по похилій площині з кутом α на довжині L , з різницею рівнів в початковій і кінцевій точках $h = l \sin \alpha$ і швидкістю в цих точках ϑ_n і ϑ_k , тоді робота сили тяжіння окремої частинки Gh , яка витрачається на роботу тертя і приріст кінетичної енергії відповідно до рівняння закону живих сил [121].

$$A_T = Gh = Gf_T \cos \alpha + \frac{G(\vartheta_k^2 - \vartheta_n^2)}{2g}. \quad (5.1)$$

Якщо відома початкова швидкість ϑ_n і заданий кут нахилу α , то кінцева швидкість на розгінній ділянці гравітаційної установки буде:

$$\vartheta_k = \sqrt{2gh (1 - f_T \cot \alpha) + \vartheta_n^2}. \quad (5.2)$$

Аналогічним чином можна визначити кінцеві швидкості на гальмівних ділянках гравітаційної установки.

5.3. Рух зернівок у полі сили тяжіння сховища

При гравітаційному завантаженні силосів зерновим вантажем на окремі зернівки вантажу діє тільки сила тяжіння, а на початку свого руху в низ силосів вони мають початкову швидкість, яка відповідає мінімальній швидкості на кінці гальмівної ділянки гравітаційної установки. При відсутності завантажувально-розподільчих пристроїв та руху вниз по гофрованому рукаву на зернівки крім сили тяжіння діє і сила опору середовища, котра стає значною для відносно легких частинок або частинок, що ружаються з великою швидкістю.

Характеристикою окремих зернівок зернового вантажу, який надходить в середину силосів, за якою треба судити про вплив середовища повітряного опору на характер руху зернівок, є швидкість витання ϑ_v . При дослідженні руху зернівок у повітряному просторі використовуються узагальнені показники: швидкість витання ϑ_v і коефіцієнт парусності K_p . Під час руху зернівок в повітряному просторі силосу, на них діє сила:

$$R = K \frac{\gamma}{g} F \vartheta^2, \quad (5.3)$$

де K – коефіцієнт опору;

γ – питома вага повітря;

F – міделевий перетин тіла;

ϑ – відносна швидкість.

Прискорення, яке отримують окремі зернівки з масою m зернового вантажу виражається формулою:

$$a = \frac{R}{m} = \frac{k\gamma F}{mg} \vartheta^2 = k_{\Pi} \vartheta^2. \quad (5.4)$$

Швидкість витання, це швидкість потоку при якому зернівка буде перебуває у завислому стані, що відповідає швидкості повітряного потоку.

Швидкість витання визначається за формулою:

$$\vartheta_{\text{в}} = \sqrt{\frac{Gg}{k\gamma F}} = \sqrt{\frac{g}{k_{\Pi}}}. \quad (5.5)$$

Якщо зерно має три різні розміри a, b, c тобто довжиною, шириною і товщиною, тоді швидкість витання $\vartheta_{\text{в}}$:

$$\vartheta_{\text{в}} = \sqrt{\frac{\gamma l}{k\rho}}, \quad (5.6)$$

де $l = \sqrt[3]{abc}$ і $F = l^2$.

Велике значення при гравітаційному завантаженні відіграє коефіцієнт парусності K_{Π} , який залежить від багатьох нестабільних факторів: форми та шорсткості поверхні зерна, стану повітряного простору, швидкості потоку повітря і навіть температури повітря [90].

Коефіцієнт парусності визначається за формулою:

$$K_{\Pi} = \frac{k\gamma F}{mg} = \frac{9,8}{\vartheta_{\text{в}}^2} \quad (5.7)$$

Значення коефіцієнта K_{Π} залежить від площі міделева перерізу, яка припадає на одиницю сили гравітації. Зі зростанням відносної площі, яка зазнає дії потоку, коефіцієнт парусності за інших однакових умов збільшується. У табл.5.1 наведено орієнтовні значення коефіцієнтів опору повітря K та парусності K_{Π} для деяких сільськогосподарських культур.

Таблиця 5.1 – Значення коефіцієнтів K і K_n для зерна деяких культур [90]

Зерно культури	Коефіцієнт опору повітря K	Коефіцієнт парусності K_n , м ⁻¹
Пшениці	0,184 – 0,265	0,075 – 0,120
Жита	0,160 – 0,220	0,100 – 1,140
Вівса	0,118 – 0,150	0,169 – 0,300
Кукурудзи	0,180 – 0,260	0,050 – 0,060

5.4. Гравітаційна установка з трьома кутами нахилу каналів

Гравітаційна установка (рис.5.5) для дослідження руху зерна складається із бункера для зберігання зернового матеріалу 1, шиберної заслінки 2, розгінної ділянки 11 каналу спуску, рухомого циліндричного шарніру 4, двох гальмівних ділянок 3 і 5 каналу спуску, нерухокої стійки 6, на якій встановлена гвинтова каретка 7, еластичних тяг 8, котрі у верхній нерухомій частині установки з'єднуються із регулювальними пристроями 9, які призначені для піднімання та опускання нижніх кінців ділянок спускного каналу, та бункера для збирання зернового матеріалу 10.

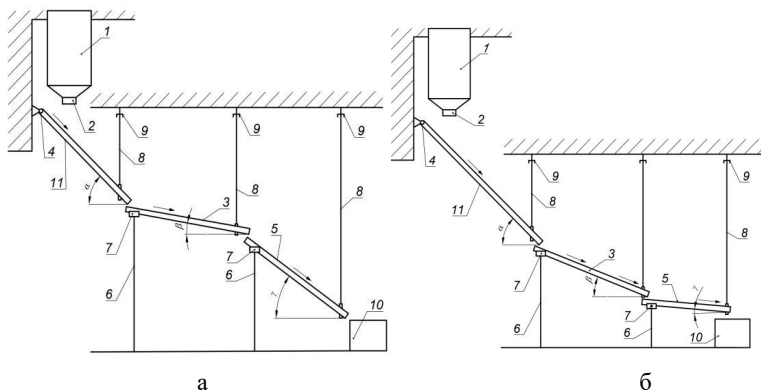


Рисунок. 5.5 – Гравітаційна установка для дослідження контролюваного руху зерна на розгінній і двох гальмівних ділянках прямого каналу

Профіль ділянок каналу має форму поздовжньо зрізаного циліндра, що повернутий відкритою стороною нагору [24]. Внутрішня робоча поверхня каналу має певний рівень шорсткості, що залежить від виду матеріалу ділянок.

Три ділянки каналу розташовуються у просторі за допомогою еластичних тяг 8, які кріпляться на кінцях жолобів каналу та можуть змінювати свою довжину завдяки регулюючим тягам 9. Розгінна ділянка біля бункера 1 кріпиться до стінки за допомогою шарніру 4. Гальмівні канали з однієї сторони встановлені на каретки 7, які можуть переміщатись уздовж нерухомих стійок 6 вгору або вниз. Розгінна ділянка встановлюється під кутом α , а гальмівні – під кутами β і γ . Можливі два варіанти розташування ділянок: $\alpha > \beta < \gamma$ (рис.5.5,а) і $\alpha > \beta > \gamma$ (рис.5.5,б). Зерно з висоти h_0 – висота між бункером та початком розгінної ділянки падає на верхню частину розгінного спускного каналу. На гальмівних ділянках зерно сповільнює свій рух. Швидкість сходужерна набуває значення близького до початкової швидкості руху зерна по розгінній ділянці каналу.

5.5. Математичне моделювання руху зернового вантажу в гравітаційній установці

Рух зерна по розгінній і гальмівним ділянкам установки вважається як ламінарна течія. Під час руху зерна між поверхнею жолоба і зовнішнім шаром зернової маси виникає сила тертя, яка залежить від матеріалу каналу і визначається коефіцієнтом тертя-ковзання μ . Вважаємо, що зерно висипається з бункера рівномірно з однаковою швидкістю, тобто маємо стаціонарний потік. Відповідно до рівняння нерозривності течії $V S = \text{const}$, враховуючи однакові поперечні перерізи усіх трьох каналів, маємо умову забезпечення стаціонарності потоку: $V_{\text{поч}} \leq V_{\text{кін}}$. Для спрощення подальших розрахунків вважається, що:

$$V_{\text{поч}} = V_{\text{кін}} = V_0.$$

У момент падіння маси з отвору бункера, розташованого на висоті h_0 від краю каналу розгінної ділянки швидкість зерна відповідає початковій швидкості

V_0 . Тоді відповідно до закону збереження енергії $mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2}$. Рухаючись по розгінній ділянці довжиною l_1 , що розташована під кутом α , зерно набирає максимальну швидкість V_{\max} . При цьому частини потенційної енергії зерна $E_{n1} = mgl_1 \sin \alpha$ переходять у кінетичну енергію. Враховуючи роботу сили тертя $A_1 = \mu mgl_1 \cos \alpha$, маємо спрощене рівняння руху зерна на розгінній ділянці установки:

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} + mgl_2 \sin \beta - \mu ml_2 \cos \beta = \frac{m(V_{\max} + V_0)^2}{8}. \quad (5.9)$$

Рух зерна по другій гальмівній ділянці довжиною, розміщеної під кутом γ , відбувається аналогічно до попередньої ділянки, і забезпечує зменшення швидкості руху зерна з $(V_{\max} + V_0) / 2$ до V_0 .

Для пошуку залежності між кутами нахилу розгінної та двох гальмівних ділянок α , β і γ розв'яжемо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2} \\ \frac{mV_0^2}{2} = mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha = \frac{mV_{\max}^2}{2} \\ \frac{mV_{\max}^2}{2} + mgl_2 \sin \beta - \mu ml_2 \cos \beta = \frac{m(V_{\max} + V_0)^2}{8} \\ \frac{m(V_{\max} + V_0)^2}{8} + mgl_3 \sin \gamma - \mu mgl_3 \cos \gamma = \frac{mV_0^2}{2} \end{cases} \quad (5.10)$$

З другого та третього рівнянь системи (5.10) знайдено:

$$\begin{aligned} \frac{mV_0^2}{2} + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta &= \frac{m(V_{\max} + V_0)^2}{8} \\ mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta &= \frac{m(V_{\max}^2 + 2V_{\max}V_0 - 3V_0^2)}{8} \\ mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta &= \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{mV_{\max}^2}{2} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{mV_{\max}V_0}{2} \right) - \frac{3}{4} \left(\frac{mV_0^2}{2} \right) \\ mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta &= \frac{1}{4} (mgl_1 \sin \alpha - \\ &\mu mgl_1 \cos \alpha) + \frac{1}{2} V_0 \sqrt{\left(\frac{mV_{\max}}{2} \right)^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{mV_0^2}{2} \right), \\ mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta &= \frac{1}{4} mgl_1 (\sin \alpha - \\ \mu \cos \alpha) + \frac{1}{2} V_0 \sqrt{\left(\frac{m}{2} \left(\frac{mV_0^2}{2} + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha \right) \right)} - \frac{1}{2} \left(\frac{mV_0^2}{2} \right). \end{aligned} \quad (5.11)$$

Використавши рівняння (5.10) для спрощення (5.11), одержимо:

$$\sin \beta - \mu \cos \beta = \frac{\sqrt{h_0^2 + h_0 l_1 \sin \alpha - h_0 \mu l_1 \cos \alpha - h_0}}{2l_2} - \frac{3l_1(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{4l_2}. \quad (5.12)$$

Права частина рівняння (5.12) буде сталою величиною при куті α , початковій висоті падіння зерна h_0 та довжинах l_1 і l_2 першої та другої ділянок пристрою. Позначивши її через b , отримаємо рівняння виду $\sin \beta - \mu \cos \beta = b$.

Представимо це рівняння у вигляді:

$$(\mu - b)tg^2 \frac{\beta}{2} + 2 \tan \frac{\beta}{2} - (\mu + b) = 0.$$

$$\tan \frac{\beta}{2} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + (\mu^2 - b^2)}}{\mu - b}.$$

Враховуючи, що кути $\alpha, \beta \in [0; \frac{\pi}{2}]$, маємо:

$$\beta = 2 \arctg \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + (\mu^2 - b^2)}}{\mu - b} \right) + 2\pi k, \text{ де}$$

$$b = \frac{\sqrt{h_0^2 + h_0 l_1 \sin \alpha - h_0 \mu l_1 \cos \alpha - h_0}}{2l_0} - \frac{3l_1(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{4l_2}. \quad (5.13)$$

Аналогічно знайдена залежність між кутами α і γ . Використовуючи друге і четверте рівняння системи (5.10), отримуємо:

$$\frac{m(V_{\max} + V_0)^2}{8} + mgl_3 \sin \gamma - \mu mgl_3 \cos \gamma + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha = \frac{mV_{\max}^2}{2}.$$

$$mgl_3 \sin \gamma - \mu mgl_3 \cos \gamma + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha = \frac{3mV_{\max}^2}{8} - \frac{mV_{\max}V_0}{4} - \frac{mV_0^2}{8}$$

$$mgl_3 \sin \gamma - \mu mgl_3 \cos \gamma + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha = \frac{3}{4}(mgl_1 \sin \alpha -$$

$$- \mu mgl_1 \cos \alpha) - \frac{1}{2}V_0 \sqrt{\left(\frac{mV_{\max}}{2}\right)^2 + \frac{mV_0^2}{4}}.$$

$$mgl_3 \sin \gamma - \mu mgl_3 \cos \gamma + mgl_1 \sin \alpha$$

$$- \mu mgl_1 \cos \alpha =$$

$$= \frac{3}{4}(mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha)$$

$$- \frac{1}{2}V_0 \sqrt{\left(\frac{m}{2}\left(\frac{mV_0^2}{2} + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha\right)\right)} + \frac{mgh_0}{2}.$$

$$gl_3 \sin \gamma - \mu gl_3 \cos \gamma + \frac{1}{4}(gl_1 \sin \alpha - \mu gl_1 \cos \alpha)$$

$$= -\frac{1}{2}\sqrt{gh_0}\sqrt{gh_0 + gl_1 \sin \alpha - \mu gl_1 \cos \alpha} + \frac{gh_0}{2}.$$

$$l_3 \sin \gamma - \mu l_3 \cos \gamma + \frac{1}{4}(l_1 \sin \alpha - \mu l_1 \cos \alpha) = \\ = \frac{1}{2} \sqrt{h_0^2 + l_1 h_0 \sin \alpha - \mu l_1 h_0 \cos \alpha} + \frac{h_0}{2}.$$

Познесемо в (5.14) кути α і γ по різні сторони рівняння:

$$\sin \gamma - \mu \cos \gamma = -\frac{\sqrt{h_0^2 + l_1 h_0 \sin \alpha - \mu l_1 h_0 \cos \alpha}}{2l_3} + \frac{h_0}{2l_3} - \frac{l_1 \sin \alpha - \mu l_1 \cos \alpha}{4l_3}. \quad (5.15)$$

Позначивши праву частину рівняння (5.15) через C , отримаємо рівняння виду $\sin \gamma - \mu \cos \gamma = C$, яке розв'язано по аналогії з рівнянням (5.12):

$$\gamma = 2 \arctg \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + (\mu^2 - c^2)}}{\mu - c} \right) + 2\pi k,$$

де:

$$C = \frac{h_0 - \sqrt{h_0^2 + l_1 h_0 \sin \alpha - \mu l_1 h_0 \cos \alpha}}{2l_3} - \frac{l_1 \sin \alpha - \mu l_1 \cos \alpha}{4l_3}. \quad (5.16)$$

Отримані рівняння (5.13) і (5.16) визначають залежність кутів β і γ від кута α .

Як видно із отриманих математичних рівнянь довжини розгінної і гальмівних ділянок суттєво впливають на співвідношення між кутами нахилу та формою самої гравітаційної установки.

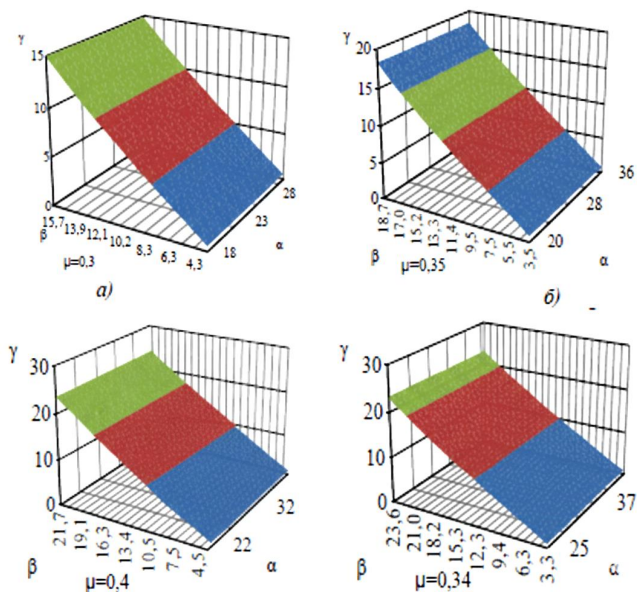
5.6. Розрахунок геометричних параметрів гравітаційного пристрою

За допомогою наведених вище рівнянь виконаний розрахунок параметрів гравітаційного пристрою, який запобігає травмування та передчасне сходження зерна, шляхом визначення оптимальних кутів нахилу розгінної та гальмівних ділянок у кожній окремій ситуації. Беручи до уваги кінцеві рівняння (5.13) та (5.16), проведений аналіз характеру зміни кутів нахилу β і γ двох гальмівних каналів при варіативній зміні визначальних факторів, що формують їх величини: α , μ , l_1 , l_2 та l_3 .

Під час дослідження брали до уваги такі діапазони зміни факторів впливу: $\alpha = 15^\circ \dots 55^\circ$, $\mu = 0,3 \dots 0,45$, $l = 0,5 \dots 3\text{м}$, $h_0 = 0,1\text{м}$. Межі значень коефіцієнту тертя-ковзання μ були вибрані так, щоб врахувати увесь діапазон зміни залежно від рівня вологості, виду зернових та типу матеріалу жолобів

гравітаційного пристрою. Довжини жолобів обирались за двома варіантами: перший – довжина розгінної ділянки повинна бути рівною сумі довжин гальмівних, тобто $l_1=l_2+l_3$ (рис.5.6); другий – всі довжини є однаковими, $l_1=l_2=l_3$ (рис. 5.7).

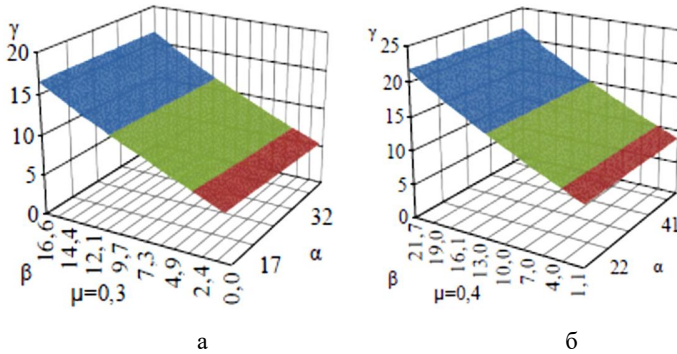
Графічне відображення результатів аналітичного аналізу характеру зміни кутів нахилу β і γ гальмівних ділянок представлено у вигляді серії просторових поверхонь відгуку на рис.5.6 і 5.7. Усі поверхні характеризують лінійну монотонну зміну кутів β і γ в залежності від кута α . Спільною характеристикою усіх поверхонь є яскраво виражена тенденція до зменшення кутів β і γ зі зростанням кута нахилу α розгінної ділянки каналу та зменшенні коефіцієнту тертя μ .



а) $\mu = 0,30$; б) $\mu = 0,35$; в) $\mu = 0,4$; г) $\mu = 0,45$.

Рисунок 5.6–Характер зміни кутів β і γ двох гальмівних каналів при варіюванні коефіцієнта тертя μ , кута нахилу розгінного каналу α та значення довжин каналів ($l_1 = 3$ м, $l_2 = 2$ м та $l_3 = 1$ м)

Зростання кута нахилу розгінної ділянки та зменшення коефіцієнта тертяковзання зумовлює зростання швидкості руху зернового потоку, що обумовлює лінійне зменшення кутів на гальмівних ділянках (рис.5.6,а...г). Це забезпечує збереження швидкості сходу зерна з гравітаційної установки рівній початковій швидкості зернового потоку при падінні зерна у розгінний канал. Підвищення гальмівного впливу на зерновий потік, а отже і більш поступове і менш різке зменшення кутів β і γ відносно кута α досягається за рахунок збільшення коефіцієнту тертяковзання μ (рис. 5.6), що може бути реалізовано зміною якості та шорсткості поверхні гальмівного каналу та іншого виду зернових.



а) $\mu = 0,30$; б) $\mu = 0,40$.

Рисунок 5.7 – Характер зміни кутів β і γ двох гальмівних каналів при варіюванні коефіцієнта тертя μ , кута нахилу розгінного каналу α та значення довжин гальмівних каналів ($l_1=l_2=l_3 = 1$ м)

Дослідження впливу співвідношень довжин розгінної та гальмівних ділянок на значення кутів показали, що за умови $l_1=l_2+l_3$ виконується наступна нерівність $\alpha > \beta > \gamma$ (рис.5.6) і установка має вигляд згідно рисунку 5.5.б. За іншого варіанту, при $l_1=l_2=l_3$ має місце нерівність $\alpha > \beta < \gamma$ (рис.5.7) і гальмівна установка має вигляд відповідно рис.5.5.а. Співвідношення, коли $\beta < \gamma$ пояснюється потребою у збільшенні кута нахилу γ для уникнення передчасної зупинки зерна на другій гальмівній ділянці, це запобігає його накопиченню і

передчасному сходу. Така конструктивна особливість, щодо різних варіантів нахилу гальмівних ділянок (рис.5.5), залежить від співвідношення їх довжин і може бути використана для задоволення різних виробничих потреб під час завантаження зерна у ємності різних типів.

Таким чином для контрольованого зменшення швидкості руху зерна по гравітаційній установці за рахунок забезпечення рівності початкової та кінцевої швидкості необхідно, щоб співвідношення між кутами нахилу α , β і γ залежить від виду зернівок, їх рівня вологості та жорсткості матеріалу з якого виготовлені похилі канали установки, і визначаються коефіцієнтом μ .

5.7. Дослідження руху зернового вантажу в гравітаційній установці з одним гальмівним каналом

В теоретичних дослідженнях використовувалась лабораторна установка (рис.5.8), котра складалась з бункера для зберігання зерна 1, розгінного 2 і гальмівного 3 лотків, які в своєму перерізі мають форму сегмента, при цьому кут нахилу лотків відносно горизонту можна змінювати за допомогою вертикальних тяг 5 [106]. Для описання механіки зернового потоку використовувалась теорія газової динаміки у формі відомого закону Менделєєва-Клапейрона [93,132].

$$p(y)\bar{\varepsilon}(y) = \chi \left(\frac{du}{dy}\right)^2 \quad (5.17)$$

де $p(y)$ – гідростатичний тиск;

$\bar{\varepsilon}(y)$ – середнє значення порозности зернового потоку;

χ – коефіцієнт, який залежить від фізико-механічних властивостей досліджуємого зернового матеріалу;

$\left(\frac{du}{dy}\right)^2$ – квадрат швидкості переміщуваного сипкого зернового середовища.

Так як у формулу 5.17 входить ділатансія [93] (зміна об'єму зернового матеріалу при зсувній деформації) зернового середовища при зсуві, то вона визначається:

$$\bar{\varepsilon}(y) = \frac{1}{1 - \varepsilon_0}, \quad (5.18)$$

де ε_0 – порознь нерухомого зернового шару ($\varepsilon_0 = \frac{V_H - V}{V_H}$, де, V_H , V – відповідно, об'єм насипного шару зерна, та об'єм який займають зернини цього шару).

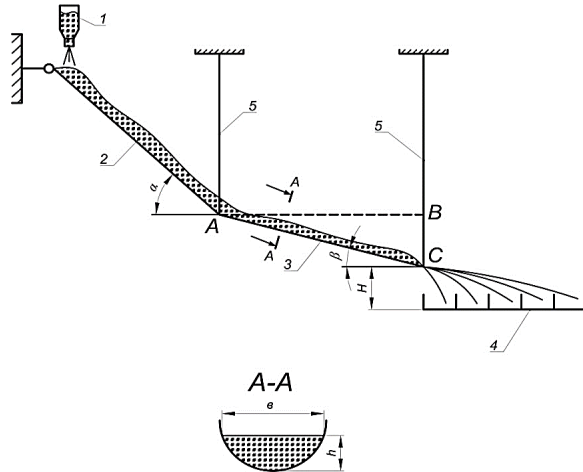


Рисунок 5.8 – Гравітаційна установка з розгінним і гальмівним лотками

Кут установки розгінного лотка визначається за такою формулою:

$$\alpha_i = \arcsin \frac{BC}{AC}, \quad (5.19)$$

де α_i – новий кут установки розгінного лотка;

AC = 1200мм – робоча довжина розгінного лотка;

BC – висота нижньої частини лотка відносно горизонту.

5.7.1. Методика проведення дослідів

В дослідях використовувалось насіння таких культур, як пшениця, кукурудза і соняшника. Партія дослідного насіння зважувалася на електронних вагах і висипалась у бункер установки. Після відкриття шиберної заслінки

бункера за допомогою секундоміра фіксувався час руху зернового матеріалу по робочим поверхням лотків. Дослід виконувався з п'яти кратним повтором.

На першому етапі досліджувався час руху зернового матеріалу тільки по робочій поверхні розгінного лотка. На початку розгінний лоток встановлювався під кутом $\alpha = 26,4^{\circ}$ до горизонту. На даному куті досліджувався час руху зерна пшениці стандартної вологості. Потім, на цьому ж куті досліджувався рух кукурудзи та соняшнику. Визначивши середній час руху насіння пшениці, кукурудзи і соняшнику на фіксованому куті $\alpha = 26,4^{\circ}$, проводилась зміна кута установки розгінного лотка. Після зміни кута досліди по чергово повторялися.

Новий кут установки розгінного лотка визначався за формулою(5.19).

На другому етапі досліджувався час руху зернового матеріалу одночасно по розгінному і гальмівному лотках. Тобто розгінний і гальмівний лотки являються одним робочим органом але з різними кутами нахилу до горизонту.

При цьому загальна довжина такого лотка складає $l_3 = 2400$ мм.

Рух зерна по розгінній і гальмівній ділянці установки розглядався як ламінарна течія з різними швидкостями руху шарів. З рівняння нерозривності течії і враховуючи, що поперечні перерізи обох лотків однакові, отримуємо умову забезпечення стаціонарності потоку на обох ділянках [106]. Тобто кінцева швидкість потоку зерна була неменша ніж початкова швидкість цього потоку на початку розгінної ділянки. Дана умова забезпечує проходження зернового матеріалу по обох ділянках без накопичення його на гальмівній ділянці.

Розгінний лоток установки мав довжину $l_1 = 1200$ мм, а кут установки лотка α вибирався більшим за кут природного відкосу досліджуємого зернового матеріалу. Довжина гальмівного лотка складала $l_2 = 1200$ мм, а кут установки цього лотка до горизонту встановлювався таким чином, щоб виконувалась наступна умова $\beta = (0,86..0,93) \cdot \alpha$. В дослідах $\beta = 0,92 \cdot \alpha$. Кути природного відкосу приймалися: для пшениці $\zeta_n = 25^{\circ}$, кукурудзи $\zeta_k = 32^{\circ}$, соняшнику $\zeta_s = 35^{\circ}$ [106].

На третьому етапі проводилися дослідження направлені на встановленні функції щільності розподілення зернового матеріалу в напрямку паралельному центральній осі розгінного і гальмівного лотків. Для цього на порозі зсіпання зерна встановлювалася кювета 4, яка призначалася для збирання зернового матеріалу, який вилітає із сегментного каналу установки (рис.5.8). Кювета складається із п'яти секцій, які розділені перегородками з відстанню 10см одна від одної. Висота установки кювета H відносно горизонталі складала 30см, а перша комірка знаходилась на деякій відстані від порога зсіпання зерна. Робоча поверхня розгінного і гальмівного каналів мали одну і ту ж шорсткість, яка забезпечувала граничне прилипання зернового матеріалу до сегментного дна лотків.

Дослідження проводилися в режимах, близьких до сталого ламінарного потоку який досягався шляхом установки гальмівного лотка під кутом близьким до кута природного відкосу зернового матеріалу, що досліджувався.

Експеримент полягав у наступному. Після встановлення кута α розгінного лотка, послідовно встановлювались кути $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ гальмівного лотка. Після встановлення кутів α і β_1 , в бункер I установки засипався зерновий матеріал. При відкритті заслінки з бункера по лоткам починався рухатись зерновий матеріал, який надходив в комірки кювети. Після закінчення руху зерна по розгінній і гальмівній ділянкам з кутами α і β_1 проводилось зважування зернового матеріалу взятого із кожної комірки кювети. В першому досліді кути нахилу становили в розгінному лотку $\alpha = 70,4^0$, а в гальмівному $\beta_1 = 67,1^0$.

Наступні досліди проводилися аналогічно, але змінювався кут β . Зважування зернового матеріалу по кожній комірці кювети дало можливість визначити функцію щільності розподілення зернового матеріалу. Крім цього, в даному досліді визначались наступні експериментальні дані: висота зернового шару h на порозі його зсіпання в кювети, ширина верхнього шару зерна a , час заповнення комірок, відстань H між порогом зсіпання і кюветом та кути нахилу розгінного і гальмівного лотків α і β .

5.8 Результати досліджень

На рис.5.9 наведені графіки залежності зміни часу руху пшениці, кукурудзи і соняшнику по робочій поверхні лотка до повного їх сходу, від кута установки розгінного лотка відносно горизонту. При цьому секундна подача пшениці на робочу частину розгінного лотка становить $q_n = 0,262 \text{ кг/с}$, відповідно кукурудзи $q_k = 0,244 \text{ кг/с}$, а соняшника $q_c = 0,286 \text{ кг/с}$.

Після обробки експериментальних даних були отримані такі рівняння регресії:

для зерна пшениці

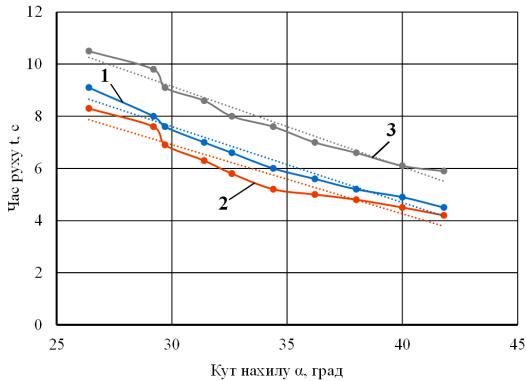
$$t_n = -0,291 \cdot \alpha + 16,33; \quad (5.20)$$

для зерна кукурудзи

$$t_k = -0,265 \cdot \alpha + 14,87; \quad (5.21)$$

для зерна соняшнику

$$t_c = -0,308 \cdot \alpha + 18,40. \quad (5.22)$$



1 – пшениця; 2 – кукурудза; 3 – соняшник.

Рисунок 5.9 – Залежність часу спуску зернового матеріалу в розгінному лотку від кутів його установки відносно горизонту

Дослідами встановлено, що рух зернового матеріалу у розгінному лотку відбувається суцільним потоком з постійною глибиною h . Час руху зернового матеріалу залежить від кута встановлення розгінного лотка відносно горизонту. Крім того швидкість спуску зерна залежить від форми і маси зернівок та коефіцієнта тертя і матеріалу з якого виготовлений лоток. Встановлено, що найшвидше з лотка спускається насіння кукурудзи, а повільніше соняшнику.

Якщо досліджувати рух пшениці одночасно по розгінному і гальмівному лотках з різними кутами нахилу до горизонту то час проходження її по робочим поверхням змінюється по різному (табл. 5.2). Довжина робочих поверхнь лотків рівна між собою.

Таблиця 5.2– Зміна часу руху пшениці стандартної вологості в розгінному і гальмівному лотках, ($l_1 = l_2 = 1200\text{мм.}$).

Величина кута установки розгінного і гальмівного лотків відносно горизонту, град		Час проходження насіння пшениці по робочим поверхням лотків, с		Сумарний час руху насіння пшениці, с
		Розгінна ділянка	Гальмівна ділянка	
α	β	t_1	t_2	$t_{\text{сум}}$
35	32	6,0	8,2	14,2
37	34	5,5	7,1	12,6
39	36	5,1	6,5	11,6
41	38	4,4	6,3	10,7
43	40	4,2	5,6	9,8

З таблиці видно, що із збільшенням кутів α і β час спуску пшениці по робочим поверхням установки зменшується. Для забезпечення повільного спуску зернового матеріалу у нижній частині силосу необхідно, щоб кут α мав максимальне значення, а кут β мінімальне. Наприклад, для пшениці $\alpha = 43^\circ$, а $\beta = 32^\circ$.

При дослідженні руху кукурудзи по розгінному лотку з кутом установки $\alpha = 70,4^\circ$ до горизонту з переходом руху кукурудзи на гальмівний лоток, який встановлено під кутом $\beta = 67,1^\circ$, виявлено, що час руху по рівним ділянкам пристрою різний. На першій розгінній ділянці час руху зернового матеріалу у

1,219 разів більший ніж на гальмівній ділянці. При зміні кута β на нову величину $\beta = 63,8^{\circ}$, час руху зернового матеріалу у 1.328 разів більший ніж на гальмівній. При зміні кута β в бік його зменшення спостерігається постійне збільшення сегментного профілю зернового потоку.

Завантаживши в бункер 1,05кг насіння соняшнику стандартної вологості визначили секундну подачу насіння на розгінний лоток. При діаметрі вихідного отвору бункера 40мм вона склала $q_c = 0,286\text{кг/с}$. Встановивши розгінний лоток під кутом $\alpha = 41^{\circ}$, а гальмівний під кутом $\beta = 38^{\circ}$, визначили час руху насіння соняшнику по робочим поверхням лотків. Час руху склав, відповідно $t_1 = 7,1\text{ с}$, $t_2 = 10,3\text{с}$. Коли кут $\beta \leq \zeta$ відбувається інтенсивне гальмування зернового потоку і зерно повністю заповнює гальмівний і розгінний канали і відбувається пересипається зерна через краї лотків.

Діаграма щільності розподілення насіння кукурудзи в напрямку паралельному центральній осі гальмівного лотка наведена на рис.5.10.

Із діаграми видно, що зерно кукурудзи, яке рухається в нижній частині лотка на порозі зсіпання має найменшу швидкість, тобто воно попадає в ближні комірки кювети. Зерно верхніх шарів має більшу швидкість, тому воно попадає в дальні комірки кювети.

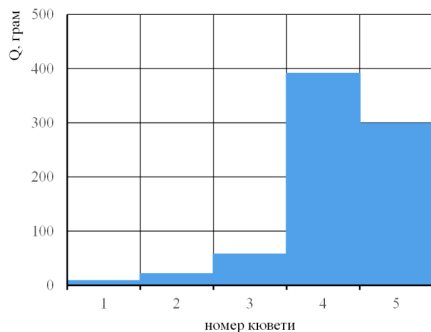


Рисунок 5.10 – Щільність розподілення насіння кукурудзи по кюветам.

Таким чином, для нормальної роботи гравітаційної установки, за допомогою якої можна завантажувати висотні силосні споруди, з дискретно

змінними кутами нахилу лотків до горизонту необхідно, щоб кути нахилу розгінного і гальмівного лотків були більші від кутів природного відкосу досліджуємого зернового матеріалу. Причому бажано, щоб кут нахилу розгінного лотка був набагато більшим від кута природного відкосу зернового матеріалу. Тоді як, кут нахилу гальмівного лотка повинен бути в 1,22 рази більшим від кута природного відкосу зерна. Зменшення кута нахилу гальмівного лотка відносно горизонту приводить до інтенсивного гальмування зернового потоку.

5.9 Деформація силосів при вивантаженні зернового вантажу

Основними видами навантажень, які діють на силоси є: статичні і динамічні навантаження. Статичні навантаження виникають при заповненні та зберіганні зернового вантажу, а динамічні – при його вивантаженні із бункера.

Встановлено, що горизонтальний тиск на стінки бункера під час вивантаження, значно вищий ніж вертикальний статичний тиск. Тому, всі циліндричні металеві силоси проектується на основі того, що внутрішні силові фактори розподіляються вісьосеметрично (рис.5.11). При цьому вага зерна тисне на стінку силосу не рівномірно, що негативно впливає на увесь процес його функціонування. Необхідно, щоб горизонтальні сили діяли рівномірно на всі сторони, а силоси завантажувались і особливо розвантажувались по центру ємності. Такий спосіб експлуатації силосів називається «центральним потоком».

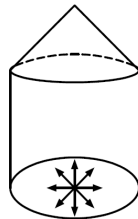


Рисунок 5.11 –Розподілення внутрішніх силових факторів на стінки циліндричного силосу

«Центральний потік» –це профіль плинності за якого в зерновому насипі створюється канал плинності через випускний отвір, в той же час як сипучий матеріал в зоні між цим каналом плинності і стінкою бункера зберігає стан спокою.

На металеві стіни повністю завантаженого силосу зерном діють горизонтальні сили. Ці сили, як показано на рис.5.11, рівномірно розподілені по всьому периметрі ємності. Розрахунок навантаження на стінки металевих силосів є критично важливим, оскільки зерно – не є рідиною. Воно має внутрішнє тертя та тертя об стінки, тому тиск зернової маси в ємності розподіляється інакше, ніж у резервуарах з рідиною. Таке специфічне навантаження на всю конструкцію силосу пов'язане із фізичними властивостями зерна сипучістю, тертям та здатністю його до ущільнення.

Нормальний горизонтальний тиск сипких зернових матеріалів на стінки металевого циліндричного силосу на глибині Z від верху засипку визначається за формулою Янсена:

$$P_{h(z)} = \frac{\gamma \cdot \rho}{f} \left(1 - e^{-\frac{\lambda f z}{\rho}} \right), \quad (5.23)$$

де $\lambda = 1 - \sin \psi$ – коефіцієнт бокового тиску зернового матеріалу;

$\rho = 0,25d$ – гідравлічний радіус поперечного перерізу круглого силосу (м);

f – коефіцієнт тертя зерна об металу стінку силосу ($f = 0,4$);

φ – кут внутрішнього тертя, ($\psi = 30^0$);

γ – питома вага зерна, (для пшениці $\gamma = 8,0 \text{ кН/м}^3$).

При розрахунку конструкції верх засипання допускається приймати на рівні верху стін, а для силосів діаметром 12 метрів і більше – на рівні 1/3 від низу висоти конуса насипу. В даному випадку глибина Z від верху засипання визначається за формулою:

$$Z = h \frac{d}{6} \tan \varphi. \quad (5.24)$$

де h – висота силосу, м.

Локальний горизонтальний тиск на стінки круглих металевих силосів визначається за формулою:

$$P_{h(z)1} = a_2 P_{h(z)}, \quad (5.25)$$

де a_2 – коефіцієнт місцевого підвищення тиску, він залежить від відношення висоти силосу до його діаметру h/d .

Горизонтальний тиск зернового матеріалу на стінки круглих металевих силосів, котрі підсилені жорсткими ребрами, які працюють на згин, необхідно визначати як суму двох тисків, тобто горизонтального і локального:

$$\Sigma P = P_{h(z)} + P_{h(z)1} \quad (5.26)$$

При подальших розрахунках необхідно врахувати і те, що температура зовнішнього середовища змінна. Перепад температур досить сильно впливає на стан зернової маси викликаючи при цьому додатковий тиск. Для його визначення використовується наступна формула:

$$P_h^n = \frac{k_t \alpha_t T_t E_m}{2d E_c t} + (1 - \nu), \quad (5.27)$$

де T_t – середня добова амплітуда коливання температури зовнішнього повітря, яка приймається як $2 \cdot Q$, де Q визначається по таблицям [133];

E_m – модуль деформації стиснення сипкого матеріалу; для зернових силосів значення E_m визначається так $E_m = 250(P_h^n)^{0,63}$, МПа;

E_c – модуль пружності стінок силосів;

k_t – коефіцієнт, який для сталевих стін дорівнює 2,5;

α_t – коефіцієнт лінійної температурної деформації матеріалу стін, 1/град;

d – внутрішній діаметр силосу, м;

t – товщина стін силосу, м;

ν – початковий коефіцієнт поперечних деформацій (коефіцієнт Пуассона), для зернових продуктів його слід приймати як 0,4.

При підвищенні вологості зерно розширюється, що приводить до різкого збільшення тиску на стінки силосу.

Приклад: В металевий силос діаметром 22,15 м і висотою 17,1 м завантажено зерно пшениці стандартної вологості. Коефіцієнт бокового тиску $\lambda = 0,5$. Гідравлічний радіус для круглого металевого силосу $\rho = d/4 = 22,25/4 = 5,562$ м.

Рішення. Характеристична глибина Z_0 , яка показує на якій відстані від поверхні тиск починає суттєво перерозподілятися на стінки за рахунок тертя визначається наступним чином:

$$Z_0 = \frac{\rho}{f\lambda} = \frac{5,5625}{0,4 \cdot 0,5} = 27,825 \text{ м}$$

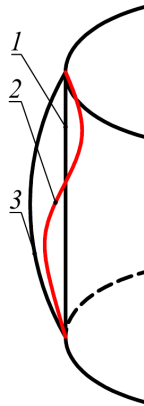
За формулою Янсена (5.23) визначається тиск на глибині $Z = 17,1$ м:

$$P_{h(17,1)} = \frac{8,0 \cdot 5,562}{0,4} \left(1 - e^{\frac{-17,1}{27,825}} \right) = 51,1 \text{ кПа.}$$

Вертикальне навантаження на стінки, котре виникає внаслідок тертя зерна, що діє на кожен квадратний метр стінки силосу на цій глибині буде:

$$P_{\mu}(z) = \mu \cdot P_h(z) = 0,4 \cdot 51,1 = 20,44 \text{ кПа.}$$

У циліндричних металевих силосах тиск, який виникає за рахунок нерівномірного витікання зернового продукту, приводить до виникнення згинальної групи зусиль (рис.5.12) і приводить до кососиметричної деформації, що є причиною втрати стійкості тонкостінної оболонки силосу.



1 – завантаження; 2 – пустий силос; 3 – вивантаження.

Рисунок 5.12 – Робоча деформація силосу при його завантаженні і вивантаженні.

Для цього необхідно провести розрахунки стінок силосу на міцність. Якщо завантаження і розвантаження силосів відбувається із

симетричним прикладанням навантаження то стіни силосів перевіряються на міцність. Величина розрахункової кільцевої повздовжньої сили, що розтягує, в нижньому ярусі на одиницю висоти від горизонтальних тисків сипких зернових матеріалів в стінах круглих сталевих силосів з урахуванням додаткових горизонтальних зусиль від температурних перепадів визначається за формулою:

$$N_{kp} = \frac{1}{\gamma_c} \sum (\gamma_f P_{h(z)} + \psi \gamma_f P_h^n) \frac{d}{2}, \quad (5.28)$$

де $\gamma_c = 0,8$ – коефіцієнт умов роботи конструкції.

Напруження в металевому листі стінової панелі:

$$\sigma_x = \frac{4N_{kp}\gamma_n}{\pi d^2} \leq [\sigma_{доп}], \quad (5.29)$$

де $\gamma_n = 0,95$ – коефіцієнт надійності та відповідності для силосних споруд другого рівня.

При вивантаженні коли зерно починає рухатись, статичний тиск переходить у динамічний. В цьому випадку горизонтальний тиск на стінки силосу може раптово зрости у 1,5...2 рази порівняно зі спокійним станом зернової маси. Якщо ж вивантаження відбувається несиметрично в цьому випадку виникає ексцентричне навантаження на стінки силосу. Дане навантаження приводить до можливого викривлення форми силосу (овалізації), що є найчастішою причиною обвалювання металевих силосних конструкцій.

Крім того під час руху великих мас зерна виникають низькочастотні вібрації які можуть послабити болтові з'єднання. Рух зернових мас веде до абразивного зносу захисного шару цинку, що призводить до корозії та втрати міцності металу. І на останок, при великій висоті стіни можуть «піти хвилями» (відбувається втрата місцевої стійкості) через вертикальну силу тертя.

Навантаження на фундамент від сталевих силосів менше на 30%, ніж від залізобетонного, тож вага сталевих зерносховищ разом із залізобетонним фундаментом становить близько 35% маси зерна [134,135]. При проектуванні силосних споруд необхідно враховувати те, що навантаження від стін на кільцевий фундамент, котрий складається із монолітних або залізобетонних конструкцій іноді доцільно використовувати кільцевий пальовий фундамент.

ВИСНОВКИ

Для зберігання великих партій зернового матеріалу використовуються висотні металеві силоси. Як правило такі ємності завантажуються гравітаційним способом. Але при падінні із значної висоти зернівки зернового матеріалу ударившись об бетонне дно травмуються. Таке травмування приводить до того, що в нижній частині зернового насипу накопичується ушкоджене зерно, яке менш стійке до зберігання, а отримані зерном травми слугують осередком розвитку шкідливих бактерій і мікробів.

Істотне покращення функціонування силосних споруд можна шляхом встановлення в середині ємностей пристроїв за допомогою яких можна зменшити швидкість падіння зерна в силоси. Так за допомогою периферійного відкритого гвинтового каналу з однією розгінною і двома гальмівними ділянками швидкість можна зменшити до початкової швидкості з якою зерновий матеріал підходить до центрального отвору силосу. При цьому кут розгінної ділянки повинен бути більшим від кутів β і γ гальмівних ділянок. Експериментально було встановлено, що кут α не повинен перевищувати 45° , адже подальше його збільшення призводило до згруження зерна на початку гальмівної ділянки внаслідок швидкого гравітаційного зсуву зернового потоку по розгінному каналу.

Для зменшення травмування зерно яке падає із значних висот можна використовувати каскадні пристрої, котрі складаються із похилих полиць і дозволяють зменшити швидкість падіння зерна на бетонне дно силосу або на шар зерна, що знаходиться вже у ємності.

Для отримання необхідної ефективності від використання бункерів і силосів нової конструкції при їх конструюванні необхідно всебічно вивчити і врахувати фізико-механічні властивості зернових матеріалів для яких призначені дані пристрої. В роботі теоретично обґрунтовані принципи роботи спіральних, каскадних і гравітаційних пристроїв і установок.

Використання висотних силосних споруд із встановленими у них пристроїв для зменшення швидкості руху зернового вантажу. сприяє елеваторним підприємствам реалізувати умову не травмування зерна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дерев'яно Д.А. Травмування та якість насіння на різних стадіях технологічних процесів. Інженерія природокористування, 2014, №1(1), С. 114-123
2. Фадєєв, Л.В. Лінійочищающе-калібруючих машин. Насінництво. Київ. 2011 №3. С. 22 – 27
3. Гапонюк, О.И.Джулинский, Д.П. Сохранение качества зерна – задача №1 для современного элеватора. // Хранение и переработка зерна. – Днепропетровск: АПК-Зерно, 2013.– № 10. – С.23 – 25
4. Samoilenko, T. V., Arendarenko, V. M., & Melnyk, V. I. (2019). Teoretychnemodelyuvannyaprotsehsuhravitatsiynohozavantazhennyasylosuzernomprov idkrytomuhvyntovomukanali. *InzheneriyaPryrodokorystuvannya*, 2 (12), 73–78 [InUkrainian]
5. Чазов, С.А., Шеляпень, П.А., Воцький, З.З. Травмирования семян и пути снижения при механизированной обработке, обмолоте и сохранении. *Украинские нивы*. 2014. №8. С.41 – 43
6. Дерев'яно, Д.А., Сукманюк, О.В., Сарана, В.В., Дерев'яно, О.Д. (2020). Обґрунтування впливу робочих органів зернозбиральних комбайнів на пошкодження і якість насіння. *Вісник аграрної науки*. №2. 2020. С.64 – 71. doi: [https://doi: org /10 310073/ agrovisnyk 2020. 02 –10](https://doi.org/10.310073/agrovisnyk.2020.02)
7. Дерев'яно, Д.А., Тарасенко, О.П., Оробінський, В.І. Вплив травмування на якість насіння зернових культур: монографія. Житомир: Нілан – ЛТД, 2012. – 440 с
8. Арендаренко, В.М., Самойленко, Т.В. Математичне моделювання процесу завантаження силосів зерном. Вісник Полтавської державної аграрної академії, № 2 – 2018. – С.158– 161
9. Войтюк, Д.Г., Яцун, С.С., Довжик, М.Я. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку: Навчальний посібник / За ред. Д.Г. Войтюка. – Суми: ВТД «Університетська книга». 2008. – 543 с.

10. Фізико – механічні властивості зерна різних сортів і ліній пшениці [Електронний ресурс] / Г.М. Господаренко, В.В. Любич, І.О. Полянська, Н. В. Воробйова / Вісник Дніпропетровського державного аграрно – економічного університету. – 2017. - №3 – С. 11 – 18. – Режим доступу; <http://nbuv.gov.ua/UJRN/ddau.2017.3.4> (дата 06. 01.2021)
11. K. Kheiralipour, M. Karimi, A. Tabatabaefar, M. Naderi, G.Khoubakht, K. Heidarbeigi Moisture-depend physical properties of wheat (*Triticum aestivum* L.) // *International Journal of Agriculture Technology*. 2008. Т. 4, № 1. С. 53 – 64
12. Господаренко, Г.М., Любич, В.В., Полянецька, І.О., Воробйова, Н.В. Фізико – механічні властивості зерна різних сортів і ліній пшениці. Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. №3(45) 2017. – С.11 – 18
13. Хайлис, Г.А. Основы теории расчет сельскохозяйственных машин. Изд-во УСХА, 1992. – 240 с
14. Заика, П.М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах: Практик. пособие. – Киев: Изд-во УСХА, 1999. – 300 с
15. Kasraei M., Rajabipour A., Tavakoli H. Relationships between grain physicochemical and mechanical properties of wheat // *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2015. № 17. С. 635– 647
16. Singh V. K., Kumar R., Verma A. Moisture-dependent some physical properties of selected wheat varieties // *Environment and Ecology*. 2025. № 43. – С. 282– 288
17. Гросул, Л.Г. Фрикційні властивості зерна у зв'язку з розробкою агрегатного крупорушального устаткування. // Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. – Одеса, 1998. – Вип.18. – С.126–132

18. Barrera G. N., Pérez G. T., Ribotta P. D., León A. E. Nano- and micro-mechanical properties of wheat grain by atomic force microscopy (AFM) and nano-indentation (НТ) and their relationship with the mechanical properties evaluated by uniaxial compression // *Journal of CerealScience*. 2019. Т. 87. – С. 1–8. DOI: 10.1016/j.jcs.2019.102

19. Л. Овсянникова, С. Орлова, Г. Гончарук. Ефективне очищення насіння від важковідокремлюваних домішок. Зерно і хліб. – 2007. - №2. – С.24 – 25

20. Табатабаеєфар А. Moisture-dependent physical properties of wheat // *International Agrophysics*. 2003. Т. 17, № 4. С. 207– 211

20. Kandel T. I., Abd El Maksoud M. A. F., Eissa A. H. A. Physical and mechanical properties of wheat grain affected by different storage methods // *Menoufia Journal of Agricultural Engineering*. 2022. Т. 5, № 3. С. 39–55. DOI: 10.21608/maje.2022.258137

21. Tverdokhlib, I.V. (2017) Dynamika rukhu chastynky v sypkomy zernovomu seredovyshhi. *Vibracija v Tekhnici ta Tekhnologijakh*, 3 (86), 2017. 128 -135 [InUkrainian]

22. Woźniak W. Mechanical properties of wheat grain in relation to internal cracks // *International Agrophysics*. 2001. Т. 15, № 2. С. 135–139

23. Зуев, Ф.Г. Подъемно – транспортне машины зерноперерабатывающих предприятий. К.: Выща школа. 1988 – 264 с

24. Антонєць, А.В., Флегантов, Л.О., Иванов, О.М., Арендаренко, В.М., Кошова, О.П. Дослідження контрольованого гравітаційного руху зерна у похилому каналі з трьома змінними кутами нахилу. *Вісник ПДАА*. 2021. № 3. С.265 – 227. doi: 10.31210/visnyk. 2021. 03. 33

25. Suppression of glucan, water dikinase in the endosperm alters wheat grain proper ties, germination and coleoptile growth / A.F. Bowerman, M, Newberry, A.S. Dielen, A. Whan, O. Larroque, J. Pritchard, F. Gubler, C.A. Howitt, B.J. Pogson, M.K. Morell, J.P. Ral // *Plant Biotechnol.* – 2016. V.14. – P. 398 – 408

26. Недовесов, В.І., Матухно, Н.В. Причини пошкодження зерна скребково – ланцюговим елеватором зернозбирального комбайна. У збірнику наукових праць НАУ «Механізація сільськогосподарського виробництва». Т. VI. – Київ: Видавництво НАУ. 1999. С. 145 – 150

27. Вітровий, А.О. Результати досліджень пошкодження зерна конвеєром. Механізація сільськогосподарського виробництва: Зб. наук. пр. Нац. агр. ун - ту. К.: В - во НАУ, 1999. Т.6. С. 34 – 36

28. Куликівський, В.Л. Результати експериментальних досліджень гвинтових транспортерів та живильників. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2013. – Вип. №32 Технічні системи і технології тваринництва. – С. 427 – 434

29. Куликівський, В.Л., Поліщук, В.К., Боровський, В.М. Дослідження процесу травмування зерна гвинтовим конвеєром. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2016, Вип. 46. С.160 – 165

30. OmarovA., MüllerP., TomasJ.(2013). Influence of loading rate on the deformation and fracture behavior of wheat grains. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 85(6), 907–913 doi:<https://doi.org/10.1002/cite.201200054>

31. Дерев'янюк Д.А. Травмування зерна внаслідок дії внутрішніх і зовнішніх чинників та якість насіння і зернофуражу. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2011, випуск 24, ч.ІС. 184 – 187

32. Сайт «propozitsiya.com». Автор М. Кирпа д-р с.-г наук, 14 грудня 2014. Травмування насіння кукурудзи та заходи щодо його обмеження. Режим доступу <https://propozitsiya.com>

33. Кирпа, М.Я., Остапенко, Л.И., Базілева, Ю.С. Травмування насіння кукурудзи та методи поліпшення якості. Бюлетень Інституту зернового господарства / УААН. – Дніпропетровськ, 2008 – №33-34. – С.210 – 213

34. Кирпа, М.Я., Пащенко, Н.А., Базілева, Ю.С. Природа травмування насіння та методи його визначення. Селекція і насінництво: між від. тем. наук. зб. / УААН, Ін-т рослинництва ім. В.Я. Юр'єва. – Х. 2009. – Вип. 97. – С. 196 - 201
35. Fan Chao, Jiao Ya-jie, Song Yupei (Henan University of Technology). Numerical simulations of laser – ultrasonic technique. *Ukrainian Journal of Physical Optics* 18: p.201 -212. doi:[10.3116/16091833/20/3/113/2019](https://doi.org/10.3116/16091833/20/3/113/2019)
36. Фан Чао. 2017. Визначення твердості пшениці на основі ультразвукового сигналу, генерованого лазером. *Український журнал фізичної оптики*. №18 – С.201-212. doi:[10.1007/s40010-018-0523-5](https://doi.org/10.1007/s40010-018-0523-5)
37. Лісеній О, Любченко І, Слюсаренко Ю. Металеві циліндричні силоси для зерна. *Наука та будівництво*. 2019. №22(4). С.27 – 32. [URL:https://doi.org/10.33644/01005](https://doi.org/10.33644/01005)
38. Дворник, А.Н., Любченко,І.Г., Титаренко, В.А., Шидловська, О.В. Основи та фундаменти циліндричних силосів для зерна. *Наука та будівництво*. 2019 (3). С.12 – 18. Режим доступу <http://nbu.gov.ua/UJRN/ntab>. 2019. 3. 3
39. Биби́к, Н.В., Биби́к, В.Н., Биби́к, И.А. Классификация силосных зернохранилищ. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. Вип.1 (40) – 2014. – *ПолтНТУ*. – С 157 – 165
40. Сайт «tsatu.edu. ua». Вибір типу та розмірів сховищ для зберігання зерна. Режим доступу:<http://www.tsatu.edu.ua>
41. Сайт «zeo. ua». Елеватори: типи та переваги використання – Grain Capital. 6 травня 2025. Режим доступу<http://zeo.ua>
42. Подпратов, Г.І., Рожко, В.І., Скалецька, Л.Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва: підручник. К.: Аграрна освіта, 2014. – 393 с
43. Сайт «Agroexpert» Стаття «Зберігання зерна у металевих силосах» 08.04.2020. Автори Віктор Опалко, Михайло Гузь, ст. викладачі, Руслан Шатров, канд. техн. наук, доцент, НУБІП, Віктор Марченко, канд. техн. наук Agroexpert (Україна). Режим доступу <https://agroexpert.ua>

44. Рудницька, А.С., Нечаєв, В.П. Інноваційні підходи до управління якістю зерна в агропромисловому комплексі. Соціальні технології: актуальні проблеми теорії та практики, 2012, вип. 53. – 90 с

45. Коваленко, М. В. Економічне обґрунтування інноваційних технологій зберігання зерна // Економіка і суспільство. Випуск #16 / 2018. – С.348 – 356

46. Занько М. Забезпечення необхідних умов для зберігання зерна, або чий силос краще адаптований. // Пропозиція. 2015. №10. – С. 106 – 110

47. Сайт «uniagrains. com». Плоскодонные силосы из гладкого металлического листа SPA – prom. st. Режим доступу <https://storage.ua.prom.st>

48. Стадник І., Сухенко Ю., Василів В. Зберігання зерна у сховищах. //Пропозиція. 2016. №11.- С.174 – 177

49. Сайт «lubnymash». Металеві силоси з плоским дном для зберігання зерна. Режим доступу <https://lubnymash.com>

50. Емкості для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах. / И.В.Горюшинский, И.И. Кононов, В.В. Денисов, Е.В. Горюшинская, Н.В. Петрушкин. Под общей редакцией И.В. Горюшинского: Учебное пособие. – Самара: СамГАПС. 2023. – 232 с

51. Мельник В.І., Самойленко Т.В. Аналіз напрямків удосконалення конструкцій пристроїв для завантаження силосів. Інженерія природокористування. – 2018. - №1 – С.83 – 90 Режим доступу <http://nbuv.gov.ua/UJRN/lprk>. 2018. 1. 13

52. А.С. 1742184 SU МКИ В65 G 65/30 Устройство для загрузки. /А.М. Нестеренко, А.И. Бараковских, В.Г. Нестеровский, А.И. Бадулин, В.И. Ратковский, В.В. Теренюк (СССР) Заявлено 16.08.90, опубл.23.06.92, Бюл. №23

53. А.С.1381039 SU МКИ В65 О 3/04, 65/32 Устройство для распределения сыпучего материала в бункере / В.И. Семеновский, СБ. Родин, В.Н. Воробьев, Н.С. Великоредчанина (СССР) Заявл. 03.09.86, опубл. 15.03.88, Бюл. №10

54. А.С. 1579856 SU МКИ В65 G 11/20 Устройство для перегрузки сыпучего материала. / Г.Ю Дробышев, Л.Ю. Цвирко, Ю.В. Дробышев (СССР) Заявл. 08.04.88, опубл. 23.07.90, Бюл. №27

55. Устройство для равномерного заполнения вертикальных сосудов. Патент 2703329 ФРГ МКУ D 65 G 65/32, 69/02, 31/04. / Г. Вейсс (ФРГ). Заявлено 27. 01. 77, опубл. 11. 09. 80. Бюл. №37

56. Пристрій для рівномірного та обережного завантаження зерна в силос: Патент на КМ: UA 90162 МПК В65 G 65/32 (2006/01) / В.С. Кожулько, Д.О. Колосков, Г.О. Колоскова (Україна). Заявлено 20. 12. 2013. Опубл. 12. 05. 2014. Бюл. №9

57. А.С. 1654155 SU МКИ В65 G 11/00 Желоб / В.М.Феликсов, В.В. Момот (СССР) Заявл. 24.02.88, опубл. 07.06.91, Бюл. №21

58. Вертикальний транспортер гравітаційно-каскадного типу для завантаження зерна, зернових культур і гранул шроту в силос. Патент на КМ: UA 83564 МҮК В 07 В 1/00, В 07В 13/00. / В.Б. Малютін (Україна). Заявлено 01. 07. 2013. опуб. 10. 09. 2013. Бюл.№17.

59. Патент України на корисну модель UA 121703, кл.В65G 11/00. Гравітаційно-каскадний транспортер з конусними дисками. / Калетнік, Г.М., Ткачук, Г.В., Мазур, В.А. [та інші]; заявник і патентовласник Вінницький національний аграрний університет. Заявл. 14.07.2017; опуб. 11.12. 2017, Бюл.23

60. Сайт «WielandVacsystems» Висувний завантажувальний рукав Vortex DN: 25-750 мм. Режим доступу <https://pneumotech.com.ua>

61. Силос елеватора. А.С. 1330060 А1 МКУ В 65 GB 65/32 / С.В. Новоселов, А.Л. Донин (СССР) . Заявл. 26. 06. 85. опубл. 15. 08. 87. Бюл. №30

62. Пристрій для покращення розподілення зерна, що надходить в верхню частинузерносховища. Патент 3868028 США МКУ D 65 65/30 / Роберт Мейсер. Подано 19. 01. 73.Опубл. 25. 02. 75 Бюл. № 325 – С. 207

63. Патент № 2237000 RU, 7 В 65 D 88/54, В 65 G 65/32 Загрузочное устройство для равномерного заполнения сыпучим материалом вертикально стоящих емкостей / Г.М. Третьяков, В.С. Горюшинский, И.В. Горюшинский и др.; Заявлено 26.11.02; Опубл. 27.09.04, Бюл. 27. 4с

64.Fiscus, D.E., Fjster, G.H. & Kaufmann, H.H. (1971). Physical Damage of Grain Caused by Various Handling Technigues. Transactions of the ASAE, 14(3), pp. 480 - 485

65. Патент на корисну модель №81377 УМПК (2013.01) А01F 25/00 Зернохосвище Фадєєва./ Фадєєв Л.В.(UA), Заявник і патентовласник Фадєєв, Л.В. – №2013 00928; заявл.25.01.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл.№12

66. Патент України на корисну модель UA 125628, кл. А01F 25/16 (2006.01), В65G 65/32 (2006.01), В65В 1/06 (2006.01). Пристрій для обережного завантаження зерна в силос / Самойленко Т. В. (UA); Иванов О. М. (UA); Арендаренко В. М. (UA); заявник і патентовласник Самойленко Т. В. (UA); Иванов О. М. (UA); Арендаренко В. М. (UA) - № u201800817; заявл. 29.01.2018; опубл. 10.05.2018, бюл. № 9

67. Патент України на корисну модель UA 129364, кл. В65G 65/32 (2006.01), А01F 25/00. Силос зі спіральним завантажувачем / Иванов О. М. (UA); Самойленко Т. В. (UA); Мельник В. І. (UA); Арендаренко В. М.(UA) заявники і патентовласники Иванов О. М.(UA); Самойленко Т. В. (UA); Мельник В. І. (UA); Арендаренко В. М.(UA) - № u201805201; заявл. 11.05.2018; опубл. 25.10.2018, бюл. № 20

68. Патент України на корисну модель UA 147476, кл. А01F 25/00, В65G 65/32 (2006.01). Силос зі спіральним завантажувачем з неоднорідним покриттям поверхні спуску. / Иванов, О. М.; Арендаренко, В. М.; Савченко, Н. К.; Сімонов, К. В.; заявник і патентовласник Полтавська державна аграрна академія. - № u202007416; заявл. 23.11.2020; опубл. 12.05.2021, бюл. № 19/2021

69. Патент України на корисну модель UA 147746, кл. В65G 65/32 (2006.01) А01F 25/18 (2006.01). Завантажувальний пристрій конусного типу. / Арендаренко, В. М.; Иванов, О. М.; Самойленко, Т. В.; Сімонов, К. В. Заявник і

патентовласник Полтавська державна аграрна академія - № u202100051; заявл. 06.01.2021; опубл. 09.06.2021, бюл. № 23

70. Патент України на корисну модель UA 151156, кл. B65G 65/32 (2006.01), A01F 25/18 (2006.01). Завантажувальний пристрій пересипного типу. / Арендаренко, В. М., Самойленко, Т. В., Іванов, О. М. Заявник і патентовласник Полтавський державний аграрний університет - № u 2022 00354; заявл. 31.01.2022; опубл. 08.06.2022, Бюл.№ 23

71. Патент України на корисну модель UA 151151, кл. B65G 65/32 (2006.01), A01F 25/18 (2006.01). Пристрій для рівномірного завантаження силосу зерном. / Арендаренко, В. М., Самойленко, Т.В., Іванов, О. М., Антонєць, А. В., Флегантов, Л. О. Заявник і патентовласник Полтавський державний аграрний університет - № u 2022 00168; заявл. 17.01.2022; опубл. 08.06.2022, Бюл.№ 23

72. Патент України на корисну модель UA 151280, кл. B65G 65/32 (2006.01), A01F 25/18 (2006.01). Завантажувальний пристрій гвинтового типу. / Арендаренко, В. М., Самойленко, Т.В., Іванов, О. М., Антонєць, А. В., Флегантов, Л. О.; Велит, І.А. Заявник і патентовласник Полтавський державний аграрний університет - № u202200164; заявл. 17.01.2022; опубл. 30.06.2022, Бюл.№ 26/2022

73. Antones, A., Arendarenko, V., Ivanov, O., Dudnikov, I.,&Liashenko, S. (2025). Development of an analytical model of the controlled movement of grain material on the bulk shelves of a loading-gravity-cascade unit. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(1(83), 13 – 19. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025330574> <https://journals.uran.ua/tarp/issue/view/19378>

74. Самойленко Т.В., Арендаренко В.М., Антонєць А.В. Кінематика руху зерна по спіральному пристрою зі змінним кутом спуску. Вісник ПДАА. 2020. № 1. С. 267 – 274

75. Moya, M., Aguado, P. J., & Ayuga, F. (2013). Mechanical properties of some granular agricultural materials used in silo design. *International Agrophysics*, 27 (2), 181–193.doi: 10.2478/v10247-012-0084-9

76. Мoya, M., Guaita, M., Aguado, P., & Ayuga, F. (2006). Mechanical properties of granular agricultural materials, part 2. *Transactions of the ASABE*, 49 (2), 479–489. doi: 10.13031/2013.20403

77. Арендаренко В.М., Самойленко Т.В., Иванов О.М. & Рижкова Т.Ю. Результати експериментальних досліджень по розподіленню падаючого зерна з тороподібної тарілки на пласку поверхню. *Scientific Progress & Innovations*, 26(1), 96 – 101. <https://doi.org/10.31210/spi.2023.26.01.15>

78. Arendarenko, V., Antonets, A., Ivanov, O., Dudnikov, I., Samoylenko, T. (2021). Building an analytical model of the gravitational grain movement in an open screw channel with variable inclination angles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (111)), 100-112. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235451>

79. Подпратов, Г.І., Рожко, В.І., Скалецька, Л.Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва; підручник. – К.: Аграрна освіта, 2014. 393 с.

80. Подпратов, Г.І., Скалецька, Л.Ф., Сеньков, А.М. Зберігання і переробка продукції рослинництва. – К.: Центр інформаційних технологій, 2010. – 495 с.

81. Лінійна алгебра та аналітична геометрія: Навч. посібник. /В.В. Булдігін, І.В.Алексеева, В.О.Гайдей, О.О. Диховичний, Н.Р. Коновалова, Л.Б. Федорова; за ред. проф. В.В. Булдігіна. – К.: ТВіМС, 2011. – 224 с

82. Іванченко Ф.К. Підйомно-транспортні машини. – К.: Вища школа, 1991 – 576 с

83. Гончарук, О.М., Спірілець, В.М. Вантажопідйомна, транспортуюча та транспортна техніка. – Рівне НУВГП, 2006. – 346 с

84. Куць, В.Р., Столярчук, П.Г. Друзьок, В.М. Кваліметрія: навч. посібник. Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 256 с

85. Деревянко Д.А. Механіко – технологічне обґрунтування процесів зниження травмування насіння зернових культур технічними засобами Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д.т.н. Тернополь, 2018. – 47 с

86. Писаренко, Г.С. та ін. Опір матеріалів: Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; За ред. Г.С. Писаренка. – 2 – ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004. – 655 с

87. Ольшанський, В.П., Богомолов, О.В., Богомолов, О.О. Про ударну взаємодію важкого твердого тіла з пружним півпростором. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв». Харків, 2018. Вип. 194.– С. 38 – 46

88. Самойленко, Т.В., Антонєць, А.В., Арендаренко, В.М., Мельник, В.І. Моделювання ударної взаємодії зерна з пласкою твердою поверхнею. Інженерія природокористування, 2021, №1(19). – С. 63– 68

89. Шваб'юк, В.І. Опір матеріалів: Підручник. – К.: Знання, 2016 – 400 с

90. Механіко – технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Навч. посібник. / О.М. Царенко, С.С. Яцун, М.Я. Довжик, Г.М. Олійник; За ред.. С.С. Яцуна. – К.: Аграрна освіта, 2000 – 243 с

91. Кильчевский, Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. Киев: Наукова думка, 1976. –319 с

92. Арендаренко, В.М.,Самойленко, Т.В., Антонєць, А.В., Іванов, О.М., Япринець, Т.С., Флегантов, Л.О. Обґрунтування частоти співудару зернівок у зерновому потоку, що рухається у гравітаційній установці. Вісник ПДАА. 2022. № 1. С. 201–206

93.Savage S.B. (1979) Gravity flow of cohesionless granular materials in chules and channels. Journal of Fluid Mechanics, 92 (1), 53-96. DOI:10.1017/S0022112079000525

94. Arendarenko, V., Kharak, R., Semenov, A & Samoilenko, T. (2025). On the impact interaction of a falling corn kernel on the concrete bottom of a silo. *Scientific Progress & Innovations*, 28(2),266-270. <https://doi.org/10.31210/spi2025.28.02.42>

95. Войтюк, Д.Г., Яцун, С.С., Довжик, М.Я. Теорія сільськогосподарських машин: Практикум: Навч. посібник / За ред. С.С. Яцуна. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 201 с

96. Войтюк, Д.Г., Гаврилюк, Г.Р. Сільськогосподарські та меліоративні машини. – К.: Каравела, 2008 – 552 с

97. Бредихін, В.В. Дисертація на здобуття наукового ступені д.т.н. Наукові основи процесів вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння. Кропивницький. 2023. – 342 с

98. Самойленко, Т.В., Арндаренко, В.М., Антонєць, А.В., Кошова, О.П. Про ударну взаємодію падаючого зерна пшениці на жорстку бетонну основу силосу. Вісник ПДАА, 2021. №2. С.259-265. DOI: 10. 31210/visnyk2021.02.34URLhtts://www.pdaa. edu. ua/sites/default/files/visnyk/2021/02/34pdf (фахове видання), IndexCopernicus

99. Богомолова, В.П., Зінченко, М.А., Богомолів, А.А. Удар шарообразного тела о наклонную плоскость. // Вісник ХДТУСГ «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв» Вип. 88. Харків. 2009. –С. 279 – 283

100. Павловський, М.А. Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512 с

101. Кармазін, В.В., Семенець, В.В. Курс загальної фізики: Навчальний посібник. К.: Кондор, 2016. – 786 с

102. Bishara, A. G., Ayoub, S. F., & Mahdy, A. S. (1983). Static pressures in concrete circular silos stor-ing granular materials. *ACI Journal Proceedings*, 80 (3), 210–216.

103. Žurovec, D., Hlosta, J., Nečas, J., & Zegzulka, J. (2019). Monitoring bulk material pressure on bottom of storage using DEM. *Open Engineering*, 9 (1), 623–630. doi: 10.1515/eng-2019-0080
104. Gao, M., Cheng, X., Hu, M., & Du, X. (2019). Simulation of static stress distribution of wheat piles in silos by the modified Cam-clay model. *International Agrophysics*, 33 (1), 11–19. doi:10.31545/intagr/103749.
105. Ю. Винников, М. Харченко, О. Кічасов, В. Марченко. Особливості роботи силосів за складних геотехнічних умов. Основи та фундаменти. 2025. Випуск 50 – 32 - 44. DOI: [10.32347/0475-1132.50.2025.32-44](https://doi.org/10.32347/0475-1132.50.2025.32-44)
106. Арендаренко, В.М., Антонєць, А.В., Савченко, Н.К., Самойленко, Т.В., Іванов, О.М. Розрахункова модель гравітаційного руху зернового матеріалу в похилому каналі з дискретно змінним кутом нахилу. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2020. №4. С. 273-282. doi: 10.31210/visnyk.2020.04.35. URL: <https://www.pdaa.edu.ua/sites/default/files/visnyk/2020/04/35.pdf>
107. Бойко, Д.І. Математичне моделювання швидкості гравітаційного руху інгредієнтів комбикормів при їх змішуванні. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія Техніка та енергетика АПК. – К.: НУБП, 2016. – Вип. 241. – С. 213 -219
108. Ходячий, В., & Нікітін, О (2023). Параметри потоків зернових матеріалів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 319(2), 314-318. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-319--314-318>
109. Stuart, B., Savage, S.B. The Mechanics of Rapid Granular Flows. *Advances in Applied Mechanics*. Vol. pp. 289-366.
110. Заика П.М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. Прак.пособие. – Киев: Изд-во УСХА, 1998. – 623 с
111. S.B, Savage and, K.Hutter. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. Published in the *Journal of Fluid Mechanics* in 1989. Vol. 199, pp. 177 – 215

112. Ren, J.-L., Zhou, J.-N., Han, L., Hu, Y.-J. (2018) Analysis of the Law Governing the Movement of Bulk Materials in a Vertical Helical Conveyer. Reneng Dongli Gongcheng. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*
113. Морозов, І.В., Дудін, О.В. Модель траєкторії руху зерна по поверхнях сільськогосподарських машин. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства «Механізація сільськогосподарського виробництва»*. 2003. №21.–С. 124–131
114. Гевко, Б.М. Математична модель руху зерна по рухомих поверхнях висівних апаратів. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Технічні науки*. 2012. №11(1). С. 113–118
115. Леженкін О., Головльов В., Михайленко О., Рубцов М. Математична модель руху часточки обчесаного вороху зернових у повітряному потоці. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. №19(3), С. 14– 21
116. Науменко, М. М., Сокол, С. П., Філіпенко, Д. В., Гурідова, В. О. (2017). Математична модель руху зернової суміші в циліндричному решеті, що обертається навколо осі. *Геотехнічна механіка*, 133, 250– 256
117. Бойко Д.І. Рівняння динаміки сипкого матеріалу в робочій зоні змішувача та його рішення. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. Науковий журнал. ХНТУСГ ім. Петра Василенка, Харків: ХНТУСГ*. 2015. - №3. – С. 75 -84
118. Мазур, С.В., Стрілець, В.М., Стрілець, О.Р., Степанюк, А.А. Рух рідини у вигляді спіралі Архімеда обертового кільця торцевого ущільнення підвищеної герметичності. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, 2017. - Вип. 35. – С. 117 – 123
119. Arendarenko V., Antonets A., Ivanov O., Dudnikov I., & Samoilenko T. Building an analytical model of the gravitational grain movement in an open screw channel with variable inclination angles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3. No7(111). P. 100-112. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235451>

121. Турбін, Б.І. Теоретична механіка. – К.: Держсільгоспвидав УРСР, 1962. – 375 с
122. Saleh K., Colshan S., Zarghami R. A. Review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos. – Basics and practical aspects // Chem. Eng. Sci. – 2018. – Vol. 192. –P. 1011-1035/ - DOI: 10.1016/j.ces.2018/08/028
123. С.Б. Севидж и Д.Дж. Джефри. Напряжения в гранулированном потоке при высоких скоростях сдвига. Журнал механики жидкости, том 110, 1981 г., С.255-272. doi: 10.1017/S0022112081000736
124. Патент України на корисну модель UA 151157 у, кл. B65G 65/32 (2006. 01), A01F 25/18 (2006. 01). Спосіб завантаження зерна у силос.
/ Арендаренко В.М., Самойленко Т.В., Іванов О.М.; Заявник і патентовласник Полтавський державний аграрний університет. -№ u2022 00355; заявл 31.01.2022; опуб.; 09. 06. 2022, бюл. №23
125. Шейко, В.М., Кушнарєнко, Н.М. Організація та методика науково-дослідницької діяльності. підручник – Київ: Знання, -2006. – 308 с
126. Надитко, В.Т. Основи наукових досліджень. Тавр. держ. агротехнол. ун-т – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 217. – 206 с
127. Silowith hopper insert, method for its construction und usethereof: pat:CA 3270526 A1 Canada. N3270526; filed 19. 10. 2022. Published 25. 04. 2024
128. Пузік, Л.М., Пузік, В.К., Рожков, А.О. Технологія переробки і зберігання продукції рослинництва. Харків: Майдан, 2015 – 414 с
129. Василенко, П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. К.: УАСХ, 1960. – 284 с
130. Несвідомін В.М. Комп'ютерні технології дослідження руху частинки по шорстких нерухомих поверхнях на прикладі вертикального конуса. Науковий вісник ТДАТУ. Випуск 2. Том 3. – С.227 – 232
131. Пилипака, С.Ф. Тригранник і формули Френе: теорія складного руху матеріальної точки та задачі на кінематику і динаміку при її русі по шорстких поверхнях. – К.: Хай-Тек Прес. 2010. – С. 297 – 397

132. Кармазін, В.В., Семенець, В.В. Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. К.: Кондор, 2024. – 760 с

133.ДБН В.1.2 – 2:2026. Системи забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і вплив. Норми проектування / Мінбуд України. – Київ: Мінбуд України, 2006. – 60 с

134. Сайт «Elevatorist. com» Стаття «Що відбувається в силосі? Знати, щоб захиститися». 2019 р. Автор Олексій Ломакін. Режим доступу <https://kmzindustries.ua>

135. Сайт «Agroexpert» Стаття «Зберігання зерна у металевих силосах» 08.04.2020 . Автори Віктор Опалко, Михайло Гузь, ст. викладачі, Руслан Шатров, канд. техн. наук, доцент, НУБІП, Віктор Марченко, канд. техн. наук Agroexpert (Україна). Режим доступу <https://agroexpert.ua>

136. Рудницька,А.С.,Нечаєв,В.П. Інноваційні підходи до управління якістю зерна в агропромисловому комплексі. Соціальні технології: актуальні проблеми теорії та практики, 2012, вип. 53. – 90 с

137. Plett, J.L. (2004). Design and testing of a low damage grain discharge system. University of Manitoba Thesis

138. Патент України на корисну модель UA 162165, U МПК (2025. 01) В65G 65/32 (2006.01), A01F 25/00. Завантажувальна гравітаційно-каскадна установка. / Іванов О.М. (UA), Арендаренко, В. М. (UA), Антонєць, А. В. (UA). Заявник і патентовласник Полтавський державний аграрний університет - № u 2025 04616; Заявл. 22.09.2025; опубл. 26.02.2026, Бюл.№ 8

139. Патент України на корисну модель UA 162166, U МПК (2025. 01) В65G 65/32 (2006.01), A01F 25/00. Спосіб гравітаційного завантаження зерна до місця складування. / Іванов О.М. (UA), Арендаренко, В. М. (UA), Антонєць, А. В. (UA). Заявник і патентовласник Полтавський державний аграрний університет - № u 2025 04617; Заявл. 22.09.2025; опубл. 26.02.2026, Бюл.№ 8

140. Патент України на корисну модель (UA) 125628, кл. A01F 25/16 (2006. 01), В65G 65/32 (2006. 01), В65В1/06 (2006. 01). Пристрій для

обережного завантаження зерна в силос / Самойленко Т.В. (UA); Иванов О.М. (UA); Арндаренко В.М. (UA); заявник і патентовласник Самойленко Т.В. (UA); Иванов О.М. (UA); Арндаренко В.М. (UA) - №201800817; заявл. 29. 01. 2018; опуб. 10. 05. 2018, бюл. №9 /2018



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **147755** (13) **U**
 (51) МПК (2021.01)
G01L 5/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2021 00247	(72) Винахідник(и): Іванов Олег Миколайович (UA), Арендаренко Володимир Миколайович (UA), Самойленко Тетяна Володимирівна (UA), Сімонов Кирило Вікторович (UA), Назаренко Назар Володимирович (UA), Удодик Віталій Михайлович (UA), Опара Надія Миколаївна (UA), Ляшенко Сергій Васильович (UA)
(22) Дата подання заявки: 25.01.2021	(73) Володілець (володільці): ПОЛТАВСЬКА ДЕРЖАВНА АГРАРНА АКАДЕМІЯ, вул. Сковороди, 1/3, м. Полтава, 36003 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 10.06.2021	(74) Представник: Іванов Олег Миколайович
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 09.06.2021, Бюл.№ 23	

(54) ЦИФРОВИЙ МОБІЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ МЕХАНІЧНОГО УДАРУ**(57) Реферат:**

Цифровий мобільний пристрій визначення сили механічного удару, який обладнаний п'єзоелектричним перетворювачем з струмовиводами. До його складу входить мікроконтролер та високорозрядний аналого-цифровий перетворювач з аналоговим диференціальним входом та цифровим послідовним інтерфейсом передачі даних, при цьому диференціальний вхід поєднується з струмовиводами п'єзоелектричного перетворювача, а за допомогою цифрового інтерфейсу відбувається комутація з мікроконтролером, що в свою чергу обладнаний радіочастотним модулем WiFi.

UA 147755 U

UA 147755 U



Фіг.

UA 147755 U

Корисна модель належить до контрольно-вимірювального та стендового обладнання для визначення величини механічного навантаження, зокрема сили механічного удару, за допомогою п'єзоелектричного перетворювачів.

Відомий пристрій для вимірювання та реєстрації сили удару на радіально кувальних машинах, що містить гідравлічний перетворювач зусилля, датчик 5 тиску, блок подвійного диференціювання, суматор, блок визначення амплітуди сигналу і реєстратор, причому вхід датчика тиску пов'язаний з гідравлічним перетворювачем, а вихід підключений до першого входу суматора і блоку подвійного диференціювання, вихід якого з'єднаний з другим входом суматора, вихід суматора підключений до входу блоку визначення амплітуди, а його вихід – до 10 реєстратора (Авторське свідоцтво СРСР № 853438, бюлетень № 29, кл. G01L 5/00, 7.08.81).

Недоліком даного пристрою є недостатня інформативність про результати вимірювання та складність електричної складової даного пристрою.

Найближчим аналогом є пристрій для вимірювання сили удару (патент на полезную модель RU 87796U1 МПК G01L 5/00 (2006.01) за заявкою 2008134198/22 від 21.07.2008), що містить 15 послідовно з'єднані п'єзоелектричний перетворювач, підсилювач струму імпульсів, амплітудний детектор, конденсатор, блок визначення амплітуди сигналу і реєстратор.

Недоліком аналогу є недостатня інформативність про результати вимірювання та мобільність використання.

Задачею корисної моделі є розробка цифрового мобільного пристрою визначення сили 20 механічного удару, який би поліпшував умови протікання експериментальних досліджень по визначенню сили механічного удару різних тіл об тверду нерухому поверхню, характеризувався мобільністю застосування та інформативністю при представленні результатів досліджень.

Поставлена задача досягається тим, що цифровий мобільний пристрій визначення сили механічного удару, який обладнаний п'єзоелектричним перетворювачем з струмовиводами, 25 згідно корисної моделі має мікроконтролер та високорозрядний аналого-цифровий перетворювач з аналоговим диференціальним входом та цифровим послідовним інтерфейсом передачі даних, при цьому диференціальний вхід поєднується з струмовиводами п'єзоелектричного перетворювача, а за допомогою цифрового інтерфейсу відбувається комутація з мікроконтролером, що в свою чергу обладнаний радіочастотним модулем WiFi.

Суть корисної моделі пояснюється блок-схемою на фіг., де відображено поєднання складових запропонованого цифрового мобільного пристрою.

Цифровий мобільний пристрій визначення сили механічного удару містить п'єзоелектричний перетворювач 1, на гранях якого, згідно прямого п'єзоефекту, формується електричний заряд під впливом зовнішньої сили механічного удару P . Зняття величини п'єзоелектрики використовуються струмовиводи 2, що підводяться до аналогового диференціального входу

високорозрядного аналого-цифрового перетворювача 3. Керування аналого-цифровим перетворювачем 3 відбувається через послідовний цифровий інтерфейс за допомогою мікроконтролера 4, що обладнується радіочастотним модулем WiFi. Аналого-цифровий перетворювач 3 та мікроконтролер 4 поєднуються між собою в одну електронну схему.

За допомогою технології WiFi мікроконтролер 4 здатен поєднуватися зі зовнішніми цифровими пристроями – смарт-пристрої 5 або персональні

комп'ютери 6, що мають власні функціональні апаратні можливості використовувати бездротову технологію WiFi для обміну інформацією.

Цифровий мобільний пристрій визначення сили механічного удару функціонує в наступний спосіб.

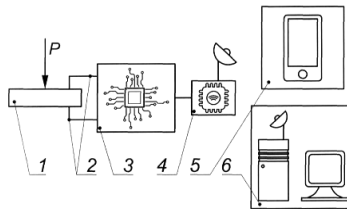
При русі довільного тіла під впливом сили тяжіння або під примусом від зовнішньої дії воно стикається з п'єзоелектричним перетворювачем 1, впливаючи на нього в силовий спосіб – виникає механічний удар силою P . Під впливом зовнішнього механічного навантаження кристал п'єзоелектричного перетворювача 1 деформується і виникає поляризація даного кристала. Ступінь поляризації кристалу при п'єзоєфекті прямо пропорційний механічному напруженню (силі удару). Створена різниця потенціалів на кристалі п'єзоелектричного перетворювача 1 знімається при посередництві струмовиводів 2 аналого-цифровим перетворювачем 3 через аналоговий диференціальний вхід. Після процедури оцифрування електричного сигналу аналого-цифровий перетворювач 1 через послідовний цифровий інтерфейс надсилає отримані результати до мікроконтролера 4, де надіслана інформація статистично обробляється і у вигляді інформаційних пакетів за допомогою бездротової технології WiFi транслюється на відображення та аналіз до смарт-пристроїв 5 чи персональних комп'ютерів 6, де користувач може проводити різноманітні маніпуляції та перетворення з відображенням функціонального зв'язку між величиною згенерованого п'єзоелектричного заряду та сили механічного удару на основі попередніх тарувальних досліджень прямого п'єзоєфекту п'єзоелектричного перетворювача 1, що був використаний у даному цифровому мобільному пристрої.

Таким чином, мінімальна кількість напівпровідникових складових, з яких складається пристрій, компактність пристрою та універсальність до використання довільного п'єзоелектричного перетворювача дозволяє суттєвим чином поліпшувати умови протікання експериментальних досліджень. При цьому отримання 5 електричного представлення механічного удару в цифровій формі та відображення його в зручний спосіб на смарт-пристроях чи персональних комп'ютерах дозволяє підвищувати інформативність досліджень.

Даний цифровий мобільний пристрій пройшов лабораторні та напіввиробничі випробування, засвідчив свою ефективність та роботоздатність.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Цифровий мобільний пристрій визначення сили механічного удару, який обладнаний п'єзоелектричним перетворювачем з струмовиводами, який **відрізняється** тим, що до його складу входить мікроконтролер та високорозрядний аналого-цифровий перетворювач з аналоговим диференціальним входом та цифровим послідовним інтерфейсом передачі даних, при цьому диференціальний вхід поєднується з струмовиводами п'єзоелектричного перетворювача, а за допомогою цифрового інтерфейсу відбувається комунікація з мікроконтролером, що в свою чергу обладнаний радіочастотним модулем WiFi.



Фіг.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Арендаренко Володимир Миколайович

Семенов Анатолій Олексійович

Іванов Олег Миколайович

**ІНЖЕНЕРНІ ОСНОВИ БЕСПЕЧНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ
ЗЕРНА В СИЛОСНІ СПОРУДИ**

МОНОГРАФІЯ

Оправа і титульна сторінка: О.М. Іванова

Комп'ютерна верстка: Арендаренка В.М., Іванова О.М.

Підписано до друку 08.04.2026 р.

Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Умовн. друк. арк. 14.

Наклад 300 прим. Замовлення 2026-15

Видавництво ПП «Астрая»

36014, м. Полтава, вул. Шведська, 20, кв. 4

Тел.: +38 (0532) 509-167, 611-694

E-mail: astraya.pl.ua@gmail.com, веб-сайт: astraya.pl.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5599 від 19.09.2017 р.

Друк ПП «Астрая»

36014, м. Полтава, вул. Шведська, 20, кв. 4

Тел.: +38 (0532) 509-167, 611-694

Дата державної реєстрації та номер запису в ЄДР

14.12.1999 р. № 1 588 120 0000 010089