

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Підвищення продуктивності протруювального комплексу з
удосконаленням системи вивантаження

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи МГ
спеціальності

208 Агроінженерія

(шифр і назва спеціальності)

Сеньківський С.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Сташків М.Я.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра технічної механіки та сільськогосподарських машин
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 208 Агроінженерія
(шифр і назва спеціальності)

студенту Сеньківському Сергію Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення продуктивності протруювального комплексу з
удосконаленням системи вивантаження

Керівник роботи Бабій Андрій Васильович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «22» 01 2025 року № 4/7-25

2. Термін подання студентом завершеної роботи 23.06.2025

3. Вихідні дані до роботи:

Продуктивність за 1 год. основного часу на насінні пшениці – 10 т/год; об'єм завантажувального бункера – 2,2 м³; місткість баків робочої рідини – 320 л; витрата робочої рідини – 10 л/т; межі дозування в мішки – 5...50 кг; споживана потужність, не більше 8 кВт; параметри роботи вагового дозатора: розхід повітря – 1,0 м³/год; тиск – 0,4 МПа

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналіз технологій протруювання насіння.

2. Рекомендації з покращення технології протруювання насіння зернових культур

3. Проектна частина.

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Загальні висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Мета і завдання дослідження; Комплекс обладнання для передпосівної обробки насіння;

Система вивантаження; Технологічна схема протруювального комплексу КПС-20;

Розрахункові схеми; Загальні висновки

6. Консультанти розділів роботи

[illegible]

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Сеньківський С.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Бабій А.В.

(прізвище та ініціали)

Реферат

Мета і завдання дослідження – підвищити продуктивність протруювального комплексу з удосконаленням системи вивантаження.

Мета досягається шляхом введення в конструкцію протруювального комплексу бункера-накопичувача для підвищення ефективності фасування в малі об'єми та забезпечення додаткового перемішування протруєного насіння.

Мета реалізовується при вирішенні наступних завдань:

виконати аналіз сучасних методів хімічного захисту рослин;
провести огляд конструкцій машин для протруювання насіння;
провести аналіз будова і принципу роботи основних вузлів протруювача;
визначення умов витікання насіння з випускного отвору бункера-накопичувача;

визначення основних параметрів бункера-накопичувача;

виконати аналіз напруженого стану оболонки бункера;

розрахунок болтового з'єднання для кріплення конусної частини бункера;

розрахунок зварного з'єднання приєднувального фланця вихідної труби.

Об'єктом дослідження – технологічний процес протруювання насіння.

Предмет дослідження – удосконалення системи вивантаження протруювального комплексу.

Практичне значення – проведене удосконалення протруювального комплексу полягає у застосуванні бункера-накопичувача, що підвищило продуктивність комплексу та якість нанесення робочого препарату на поверхні насіння.

Робота складається з вступу, чотирьох розділів, використаної літератури та додатків.

Ключові слова. Протруювач, види протруювання, хімічний захист, бункер-накопичувач, продуктивність, технологічний процес.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ПРОТРУЮВАННЯ НАСІННЯ	7
1.1 Аналіз сучасних методів хімічного захисту рослин.....	7
1.2 Необхідність та способи протруювання насіння	8
1.3 Огляд конструкцій машин для протруювання насіння	14
1.4 Обґрунтування доцільності вдосконалення протруювального комплексу	17
2 РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОТРУЮВАННЯ НАСІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР	19
2.1 Основне призначення та технічна характеристика протруювального комплексу КПС-20	19
2.2 Будова і принцип роботи основних вузлів протруювача	21
2.3 Визначення умов витікання насіння з випускного отвору бункера-накопичувача	24
3 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	30
3.1 Визначення основних параметрів бункера-накопичувача	30
3.2 Аналіз напруженого стану оболонки бункера	32
3.3 Розрахунок болтового з'єднання для кріплення конусної частини бункера ...	37
3.4 Розрахунок зварного з'єднання приєднувального фланця вихідної труби	43
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	46
4.1 Ризики та аварійні ситуації, пов'язані з процесом протруювання насіння.....	46
4.2 Вимоги безпеки при роботі з протруювачем насіння	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	50
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

ВСТУП

Одним із ключових чинників підвищення врожайності сільськогосподарських культур є ефективна передпосівна підготовка насіннєвого матеріалу. З-поміж численних агротехнічних заходів саме протруювання насіння є базовим методом захисту рослин на ранніх етапах розвитку. Ця технологічна операція передбачає обробку насіння хімічними, біологічними або фізичними препаратами з метою знищення збудників хвороб, що локалізуються на його поверхні або всередині, а також зменшення шкоди від ґрунтових патогенів і шкідників.

Зернові культури, зокрема пшениця, ячмінь, жито й овес, належать до стратегічно важливих у структурі рослинництва України. Проте в останні роки спостерігається зростання шкоди, спричиненої грибковими хворобами (септоріоз, фузаріоз, сажкові хвороби), що значно знижують енергію проростання, схожість та життєздатність молодих рослин. За даними Державної служби з питань безпечності харчових продуктів та захисту споживачів, до 30–50 % потенційної продуктивності зернових культур втрачається через недосконалий фітосанітарний стан насіннєвого матеріалу. У зв'язку з цим виникає об'єктивна необхідність у впровадженні сучасних систем протруювання як на промисловому, так і на фермерському рівнях.

Протруювання насіння не лише забезпечує базовий рівень фітосанітарного захисту, але й сприяє формуванню рівномірних і дружних сходів, що особливо важливо за умов короткого періоду весняної вегетації. Більше того, сучасні системи протруювання дають можливість одночасно застосовувати стимулятори росту, мікроелементи та біопрепарати, що покращує адаптаційні властивості культури до стресових умов середовища. Таким чином, протруювання стає не лише захисним, а й технологічно інноваційним елементом агротехніки.

Разом із тим, ефективність цього процесу значною мірою залежить від типу обладнання, точності дозування препаратів, рівномірності нанесення

робочого розчину на поверхню насіння, а також від дотримання технологічних параметрів протруювання. Недостатнє чи надмірне внесення препарату може призвести до фітотоксичності, погіршення якості проростання або зниження ефективності захисту. Відтак оптимізація конструкцій протруювальних машин та розробка нових систем подачі й змішування робочих компонентів є одним із актуальних напрямів у сфері агроінженерії.

Отже, актуальність теми дослідження зумовлена як зростаючими вимогами до якості насіннєвого матеріалу, так і необхідністю пошуку ефективних, енергоощадних і екологічно безпечних методів його обробки. Саме тому наукове обґрунтування та вдосконалення технічних засобів для протруювання насіння зернових культур має важливе значення для підвищення ефективності агровиробництва та продовольчої безпеки країни.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ПРОТРУЮВАННЯ НАСІННЯ

1.1 Аналіз сучасних методів хімічного захисту рослин

Хімічний захист рослин охоплює комплекс заходів, спрямованих на знищення або стримування розвитку шкідливих організмів за допомогою пестицидів. Сучасна аграрна практика передбачає декілька методів хімічного впливу, серед яких: протруювання насіння перед висівом, обприскування та обпилювання посівів і ґрунту хімічними препаратами, застосування аерозольних форм у закритих і відкритих приміщеннях, обробка теплиць і зерносховищ, фумігація рослин, ґрунту та насіннєвого матеріалу, розміщення отруйних принад, а також внесення гранульованих форм препаратів безпосередньо в ґрунт.

З урахуванням зазначених методів, технічний парк машин для хімічного захисту поділяється на такі групи: машини для протруювання насіння, обприскувачі, обпилювачі, генератори аерозолів, фумігатори, розкидачі принад, аплікатори гранульованих препаратів, а також допоміжні пристрої для приготування та подачі робочих рідин у баки обприскувачів.

Машини кожної групи можуть класифікуватися за різними критеріями: функціональне призначення, джерело енергії, вид виконуваної технологічної операції, спосіб приєднання до енергетичного засобу тощо. Усі засоби хімічного захисту повинні відповідати низці агротехнічних вимог. Наприклад, при передпосівній обробці насіння важливо забезпечити його цілісність, рівномірність покриття препаратом та точність дозування з відхиленням не більше $\pm 3\%$ від розрахункового значення.

Польові обробки слід проводити в оптимальні терміни, визначені з урахуванням зональних особливостей та рекомендацій служби захисту рослин. Робочий розчин повинен мати стабільний склад, а похибка у концентрації пестициду не повинна перевищувати $\pm 5\%$.

Обприскувачі, обпилювачі та аерозольні генератори повинні забезпечувати заданий рівень подрібнення робочої рідини, рівномірне нанесення препарату по всій ширині оброблюваної поверхні з дотриманням норми витрати. При цьому допустима нерівномірність розподілу рідини по ширині захвату не повинна перевищувати 30%, а по довжині гону – 25%. Допустиме відхилення дози при обпилюванні – $\pm 15\%$, при обприскуванні – від -20% до $+15\%$.

Оптимальні погодні умови також є визначальними для ефективності обробки: швидкість вітру при обприскуванні не повинна перевищувати 5 м/с, а при обпилюванні – 3 м/с. Не рекомендується проводити хімічну обробку при температурі вище 23 °С, наявності висхідних потоків повітря, а також під час дощу. Якщо опади випали протягом 24 годин після обробки, слід виконати повторну обробку. Окрім цього, обприскування культур у фазу цвітіння є небажаним, оскільки це може призвести до зниження врожайності та негативного впливу на запилювачів.

1.2 Необхідність та способи протруювання насіння

Протруювання насіння є одним із ключових етапів передпосівної підготовки, який має на меті запобігання розвитку збудників хвороб, що можуть суттєво знизити схожість, урожайність і якість сільськогосподарських культур.

Протруювання насіння також є профілактичним заходом, який дозволяє ефективно знешкоджувати широкий спектр патогенних мікроорганізмів та забезпечувати здоровий старт для розвитку майбутньої рослини. Завдяки обробці спеціальними препаратами досягається комплексне знезараження насіння як від внутрішньої інфекції (що локалізується всередині зернівки), так і від зовнішніх патогенів, що перебувають на поверхні насіння, у

навколишньому ґрунтовому середовищі або на рослинних рештках попередніх культур (рис. 1.1).



а)

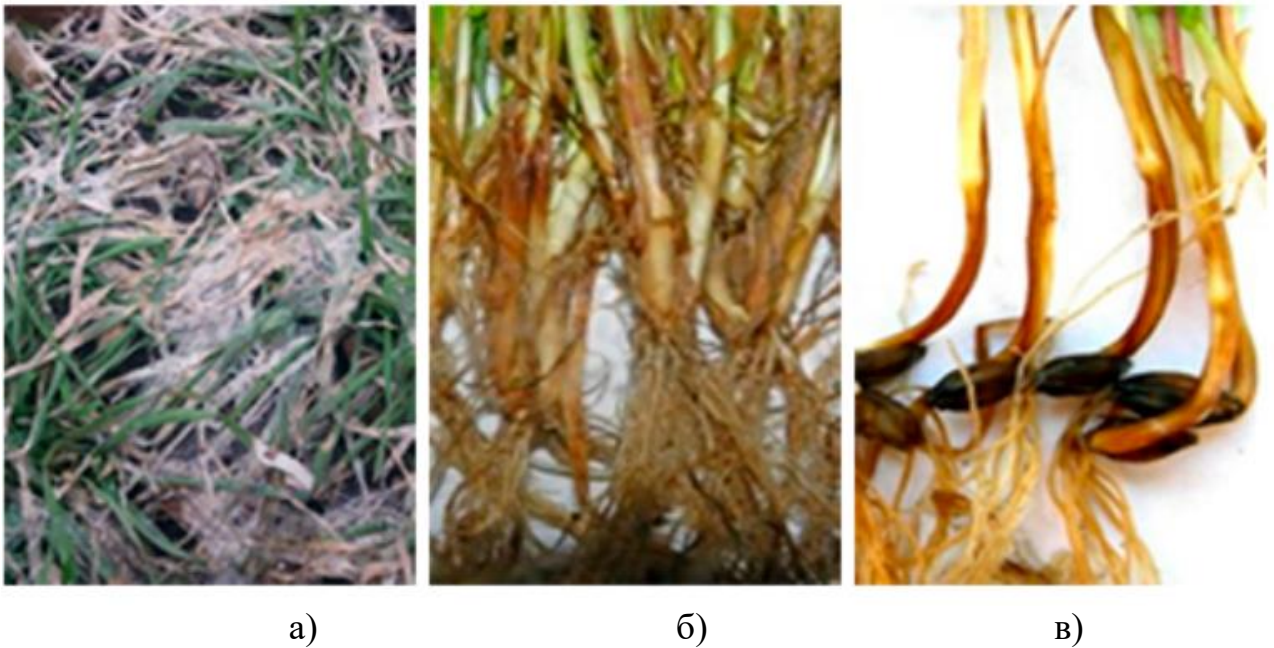
б)

а – тверда сажка; б – летюча сажка

Рисунок 1.1 – Хвороби зернових культур

Унаслідок впливу патогенів на початкових етапах вегетації істотно знижується енергія проростання, відбувається загушення сходів слабкими або нежиттєздатними рослинами, що, у свою чергу, спричиняє зниження врожайності та погіршення загального фітосанітарного стану посівів. Особливо небезпечними є приховані інфекції, які не проявляються візуально на стадії передпосівної оцінки, але в подальшому призводять до розвитку хвороб, таких як тверда та летюча сажка, фузаріоз, гельмінтоспоріоз та інші.

Іншим прикладом можуть бути такі хвороби зернових, рис. 1.2.



а – снігова пліснява; б – фузаріозна гниль; в – гельмінтоспоріозна гниль
Рисунок 1.2 – Хвороби зернових, що вражають кореневу систему

Використання сучасних препаратів на основі комбінованих діючих речовин дає змогу значно розширити спектр захисної дії. Такі комбінації поєднують фунгіцидні, інсектицидні, а іноді й біологічно активні компоненти, що дозволяє не лише знищити широкий набір патогенів, а й стимулювати початковий ріст та розвиток проростків. Наприклад, поєднання системної та контактної дії забезпечує подвійний ефект захисту: контактні речовини знезаражують поверхню насіння, тоді як системні проникають у тканини та захищають паростки в перші фази їхнього росту.

Загалом, ефективне протруювання насіння не тільки мінімізує втрати на ранніх етапах розвитку рослин, а й закладає підґрунтя для реалізації потенційної врожайності культури, підвищуючи рентабельність і стабільність сільськогосподарського виробництва. У сучасних агротехнологіях цей процес є одним із базових елементів інтегрованого захисту рослин, що особливо актуально за умов інтенсифікації землеробства та посилення біотичного навантаження внаслідок зміни клімату.

Поєднання фунгіцидних і інсектицидних протруювальних препаратів дозволяє реалізувати комплексний захист насіннєвого матеріалу ще до моменту

його проростання, що є критично важливим для збереження потенціалу майбутнього врожаю. Такий підхід забезпечує не лише ефективне знезараження насіння від збудників грибкових та бактеріальних хвороб, але й надійний бар'єр проти широкого спектра шкідників, які активно розвиваються в ґрунтовому середовищі (рис. 1.3).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.3 – Шкідники зернових культур

На рис. 1.3 показані основні шкідники зернових культур: а – дротяник; б – хлібна жужелиця; в – озима совка; г – озима муха.

Зокрема, інсектицидні компоненти в складі протруйників пригнічують активність таких небезпечних ґрунтових фітофагів, як личинки коваликів (дротяники), личинки хлібної жужелиці, різні види підгризаючих совок, злакові мухи (гессенська, шведська, стеблова) та інші шкідники, що мешкають у верхньому шарі ґрунту й пошкоджують як насіння, так і молоді проростки.

Особливої актуальності набуває захист від ґрунтових шкідників, які є надзвичайно небезпечними саме в ранній період розвитку культури. Їх діяльність призводить до порідіння посівів, нерівномірного розвитку рослин у рядках, виникнення осередків випадіння сходів, що ускладнює міжрядну обробку і загалом знижує рівномірність формування продуктивного стеблостою. У результаті значно погіршується структура посівів, знижується конкурентоздатність культури проти бур'янів та зменшується кінцева врожайність.

Крім того, деякі ґрунтові шкідники є векторами збудників вірусних хвороб, які можуть передаватися на стадії проростання або через пошкодження кореневої системи. У зв'язку з цим профілактичне інсектицидне протруювання має не лише фізіологічний, а й фітосанітарний ефект, підвищуючи загальний імунітет рослинного організму.

Тобто, комбіноване протруювання із застосуванням фунгіцидів та інсектицидів є технологічно доцільним і агрономічно виправданим заходом, який забезпечує комплексну безпеку проростків у критичний період формування майбутньої продуктивності посівів. Такий підхід є невід'ємною частиною інтегрованих систем захисту, рекомендованих сучасними аграрними протоколами у вирощуванні зернових культур.

Для вирішення цієї проблеми існує два основні підходи до знезараження посівного матеріалу – хімічний та термічний.

Хімічне протруювання є найбільш поширеним і здійснюється або безпосередньо перед висівом, або з певним випередженням у часі. Процес

полягає в нанесенні на поверхню насіння хімічних засобів захисту у вигляді порошків або рідин. Відповідно до агрегатного стану пестицидів розрізняють сухе, мокре та зволожене (напівсухе) протруювання.

Сухий спосіб передбачає використання порошкоподібних препаратів, які розпорошуються на насіння. Через значний рівень запилення сухе протруювання застосовується переважно з додаванням невеликої кількості води (1–2%) з прилипачами, що покращують фіксацію засобів на поверхні зерна.

Мокре протруювання реалізується шляхом змочування насіння розчином пестицидів. Унаслідок цього його вологість істотно підвищується, що унеможливорює висів або зберігання без попереднього просушування. Цей недолік обмежує застосування методу в господарствах.

Зволожене або напівсухе протруювання полягає у нанесенні концентрованих рідких препаратів у малих кількостях – 10–15 л/т насіння. Такий підхід забезпечує ефективний захист без істотного підвищення вологості, що дозволяє відразу переходити до сівби або зберігати насіння впродовж тривалого часу.

У випадках, коли збудники знаходяться всередині тканини насіння і обробка хімікатами є недостатньо ефективною, застосовують термічне знезараження. Цей метод передбачає нагрівання насіння у воді до температур, за яких знищуються патогени, але зберігається життєздатність зародка.

Відомі два способи термічної обробки: однофазний і двофазний. В однофазному способі насіння витримується у гарячій воді (45–47 °C) протягом двох годин, після чого його охолоджують і висушують. Двофазний метод починається з витримування у теплій воді (28–30 °C) протягом 4 годин (перша фаза), після чого насіння на 8 хвилин занурюють у гарячу воду (50–53 °C), потім охолоджують і висушують (друга фаза).

Для реалізації хімічного протруювання в умовах господарств використовуються машини різного типу ПС-10А, ПК-20, ПС-30, "Мобітокс", ГПП-5, а в умовах насіннєвих калібрувальних заводів – АПС-4, АПЗ-10, ПС-5.

Для термічного знезаражування використовується спеціалізоване обладнання комплексу КТС-0,5. Щодо обробки бульбоплодів, зокрема картоплі, то для цієї мети застосовують установки типу "Гуматокс".

1.3 Огляд конструкцій машин для протруювання насіння

Розглянемо деякі особливості та характеристики протруювачів, що є на ринку України.

Шнековий протруювач насіння марки ПСШ-20 (рис. 1.4) належить до типу машин, визначених згідно з вимогами ДСТУ 2189-93, і призначений для обробки насіння зернових та інших культур захисними препаратами перед висівом. Це самохідна установка, що працює на базі електричного двигуна з номінальною потужністю 5,5 кВт. Машина відзначається високою ефективністю та адаптованістю до умов господарств середньої продуктивності, забезпечуючи протруювання в межах від 3 до 20 тонн насіння на годину.



Рисунок 1.4 – Протруювач насіння шнековий ПСШ-20

Технічна конструкція передбачає наявність трьох форсунок для рівномірного нанесення робочого розчину, що подається за допомогою насоса-дозатора, який працює від мережі 220 В. Об'єм баку для робочої рідини становить 160 літрів. Діапазон подачі рідини регулюється в межах від 1,2 до 5,0 л/хв, що дозволяє точно дозувати препарат відповідно до норми витрати.

Для транспортування та подачі насіння використовуються шнеки з гвинтами діаметром 160 мм (для подачі та підйому) та 200 мм (для підбору), а завантажувальний шнек має ширину від 2 до 3 метрів. Максимальна висота вивантаження обробленого насіння становить 2,7 м, що дозволяє зручно завантажувати оброблений матеріал у транспортні засоби чи контейнери.

Відмінною рисою машини є висока повнота протруювання – до 100 %, а підвищення вологості обробленого насіння не перевищує 1 %, що відповідає сучасним вимогам до якості передпосівної обробки.

Габаритні розміри машини у транспортному положенні становлять 2200×2050×2900 мм, а в робочому – 4300×3000×2900 мм. Загальна маса агрегату – 580 кг. Для повноцінного функціонування та обслуговування достатньо одного оператора, що значно спрощує експлуатацію в польових умовах.

Детальні технічні параметри підтверджують, що ПСШ-20 є ефективним рішенням для господарств, які потребують якісного, рівномірного та економічного протруювання насіннєвого матеріалу з мінімальними витратами людських і енергетичних ресурсів.

Камерний протруювач ПК-20 "Супер" (рис. 1.5) розроблений для високоефективної передпосівної обробки насіннєвого матеріалу зернових культур шляхом нанесення водних розчинів або суспензій фунгіцидних препаратів. Конструкція машини реалізована на базі самохідної системи з електричним приводом, що забезпечує повну автономність і стабільність функціонування.



Рисунок 1.5 – Камерний протруювач ПК-20 "Супер"

Протруювач оснащено сучасними засобами автоматичного контролю та регулювання ключових параметрів технологічного процесу, зокрема подачі насіння і дозування робочого розчину. Це дозволяє виконувати обробку в повністю автоматизованому режимі, що суттєво зменшує вплив людського фактора і підвищує точність дозування.

Завдяки впровадженню раціональної системи розподілу насіння всередині робочої камери та вдосконаленій конструкції розпилювального вузла, досягнуто значного підвищення рівномірності нанесення засобу захисту і загальної якості протруювання.

Оптимальна компоновка агрегатів забезпечує машині високу маневреність, низьке енергоспоживання та помірну масу, що позитивно впливає на зручність переміщення та експлуатацію у виробничих умовах. За окремим запитом користувача можливе дооснащення машини системою автоматичного регулювання подачі робочої рідини (САРР), яка підтримує стабільну витрату препаратів відповідно до заданих параметрів.

Протруювач ПК-20 "Супер" відзначається простотою обслуговування, надійністю у роботі та високим рівнем технологічної адаптації до потреб сучасного насіннєвого господарства.

Протруювач камерного типу ПК-20 "Супер" характеризується високою продуктивністю, яка регулюється залежно від умов експлуатації в межах від 3 до 20 тонн насіння за годину. Такий діапазон забезпечує гнучкість використання агрегату як у невеликих фермерських господарствах, так і на спеціалізованих насіннєвих підприємствах.

Основний завантажувальний шнек має ширину від 2 до 3 метрів, що дає змогу здійснювати безперебійну подачу насіння з різних ємностей або бункерів. Висота вивантаження обробленого насіння досягає 2,7 метра, що забезпечує зручність завантаження матеріалу у транспортні засоби або тару різного типу.

Бак для робочої рідини має об'єм 160 літрів, що дозволяє тривалу безперервну роботу без необхідності частого поповнення. Дозування робочої рідини здійснюється з подачею від 0,5 до 3,5 л/хв, що забезпечує точність нанесення препарату відповідно до агрономічних норм.

Електропривод машини споживає потужність 5,5 кВт, що є оптимальним показником з погляду енергоефективності для машин даного класу. Загальні габаритні розміри у робочому положенні становлять 4300×2980×2900 мм, що свідчить про відносно компактну будову з урахуванням її продуктивності. Маса машини становить 655 кг, що дозволяє легко транспортувати її по території господарства і встановлювати на робочому майданчику без потреби у спеціалізованій техніці.

1.4 Обґрунтування доцільності вдосконалення протруювального комплексу

Застосування стаціонарних протруювальних комплексів виявляється найбільш ефективним на спеціалізованих підприємствах, які займаються підготовкою та реалізацією посівного матеріалу. У порівнянні з мобільними (самохідними) протруювачами, такі комплекси мають значно ширший функціональний потенціал, зокрема щодо можливості фасування насіння у тару

різного типу – від дрібної (мішки, пакети) до великогабаритної, включно з безпосереднім завантаженням у транспортні засоби. Окрім того, реалізується можливість точного дозування матеріалу за масовими параметрами.

Попри переваги багатофункціональності, експлуатація подібних комплексів супроводжується низкою ускладнень. Зокрема, спостерігаються періодичні зупинки вивантажувальної системи під час заміни або заповнення тари, що призводить до зниження продуктивності та втрат посівного матеріалу через висипання на поверхню. Для усунення вказаного недоліку запропоновано конструктивне вдосконалення – введення до складу комплексу буфера у вигляді бункера-накопичувача. Такий елемент дозволить здійснювати накопичення протруєного насіння до моменту подальшої його обробки (зважування, фасування), що, у свою чергу, зменшить кількість пусків і зупинок приводу вивантаження та позитивно вплине на загальну зносостійкість системи.

За необхідності насипного завантаження у великі транспортні засоби конструкцією може бути передбачено перекриття живильного каналу бункера-накопичувача за допомогою заслінки, що забезпечить вивантаження безпосередньо через інший вивідний рукав. Такий варіант подачі насіння може застосовуватися як для обробленого, так і для необробленого матеріалу.

Предбачене вдосконалення може бути реалізоване з використанням типових конструктивних рішень, аналогічних до завантажувальних бункерів, що значно спростить його впровадження. Застосування бункера-накопичувача дозволить не лише підвищити ефективність фасування в малі об'єми, а й забезпечити додаткове перемішування протруєного насіння. Це сприятиме більш рівномірному розподілу препарату на поверхні зерна, зокрема в місцях, де покриття було недостатнім під час основної обробки.

2 РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОТРУЮВАННЯ НАСІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

2.1 Основне призначення та технічна характеристика протруювального комплексу КПС-20

Протруювальний комплекс КПС-20 призначений для обробки насіння зернових культур хімічними препаратами на водній основі – як у вигляді розчинів, так і суспензій. Комплекс забезпечує точне дозування препаратів і рівномірне нанесення на насіння перед висівом. Окрім функції протруювання, обладнання виконує операції фасування обробленого насіння у мішки з можливістю точного дозування та підрахунку кількості, транспортування до мішкозашивної лінії та зашивання мішків. У разі необхідності є можливість вивантаження насіння без фасування, наприклад, безпосередньо у кузов транспортного засобу.

Продуктивність КПС-20 під час обробки пшениці становить до 10 тонн за годину основного часу. Об'єм завантажувального бункера дорівнює 2,2 м³, що дозволяє забезпечити безперервну подачу насіння в протруювальну камеру. Бак для робочої рідини має місткість 320 літрів, а середня витрата пестицидного розчину на одну тонну насіння становить 10 л.

Обладнання дозволяє дозувати насіння у мішки в межах від 5 до 50 кг. Комплекс приводиться в дію електродвигунами, які живляться від мережі змінного струму напругою 380 В та частотою 50 Гц. Загальна споживана потужність не перевищує 8 кВт. Ваговий дозатор працює з витратою повітря до 1,0 м³/год при робочому тиску 0,4 МПа.

До складу протруювального комплексу входить кілька функціональних модулів: завантажувальна та розвантажувальна норії, бункери, протруювач, ваговий дозатор, лінія транспортування та зашивки мішків. Всі ці компоненти з'єднані між собою в єдиний технологічний ланцюг, що забезпечує автоматизовану та ефективну обробку насіння.

Для обслуговування всього комплексу достатньо трьох працівників. Конструкційна маса обладнання у повному зборі з усіма робочими органами становить до 3800 кг. Габаритні розміри: довжина – до 6000 мм, ширина – до 4000 мм, висота – до 8000 мм. Мінімальний гарантований строк служби становить не менше 5 років.

До складу технічного комплексу входять такі основні вузли, рис. 2.1:

1 – вхід насіння; 2 – норія завантажувальна; 3 – норія розвантажувальна; 4 – бункер завантажувальний; 5 – бункер розвантажувальний; 6 – протруювач; 7 – ваговий дозатор; 8 – лінія транспортування та зашивки мішків.

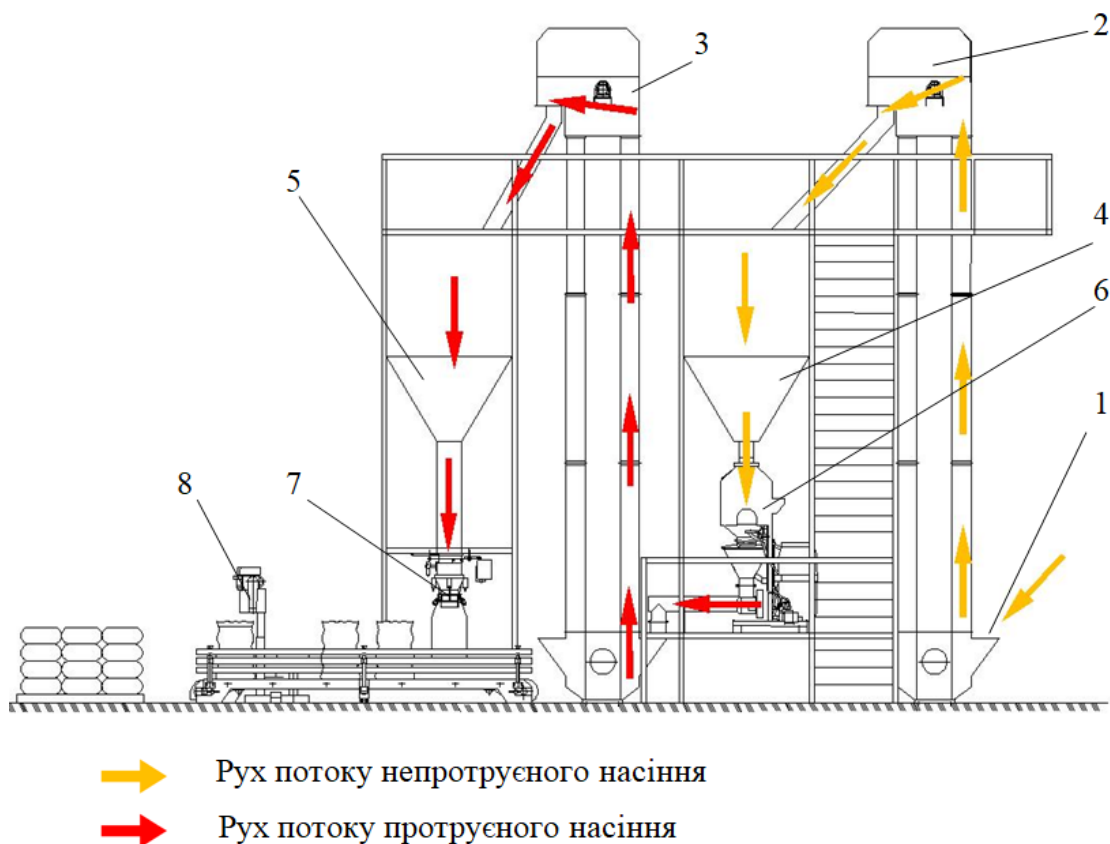


Рисунок 2.1 – Технологічна схема протруювального комплексу КПС-20

Функціонально комплекс КПС-20 виконує такі операції:

- приготування та подача робочого розчину;
- завантаження очищеного насіння у бункер;
- безпосереднє протруювання насіння;
- транспортування обробленого насіння до розвантажувального бункера;

- точне дозування у мішки з функцією підрахунку;
- зашивання мішків за допомогою мішкозашивної машини.

Важливо зазначити, що ваговий дозатор та мішкозашивна лінія функціонують автономно, незалежно від решти системи, що дозволяє підвищити ефективність роботи.

2.2 Будова і принцип роботи основних вузлів протруювача

Процес протруювання насіння в установці КПС-20 реалізується у чіткій послідовності операцій, що координуються за допомогою автоматизованої системи контролю. Робота починається з подачі насіння до завантажувального бункера. Далі насіння надходить через дозувальний пристрій у камеру протруювання. Одночасно туди подається розрахована кількість робочої рідини, яка дозується окремим насосом. У камері відбувається змішування насіння з рідиною та покриття поверхні насіння захисним препаратом. Оброблене насіння подається в розвантажувальний бункер за допомогою шнекового механізму.

Робота вузлів синхронізується за допомогою трьох сенсорів-рівнемірів, установлених у бункері насіння (рис. 1.6). Система контролю рівня насіння в автоматичному режимі дозволяє підтримувати точний баланс між подачею насіння і робочої рідини. У разі відсутності насіння у бункері всі процеси зупиняються до моменту заповнення резервуара.

Протруювач може працювати в трьох режимах:

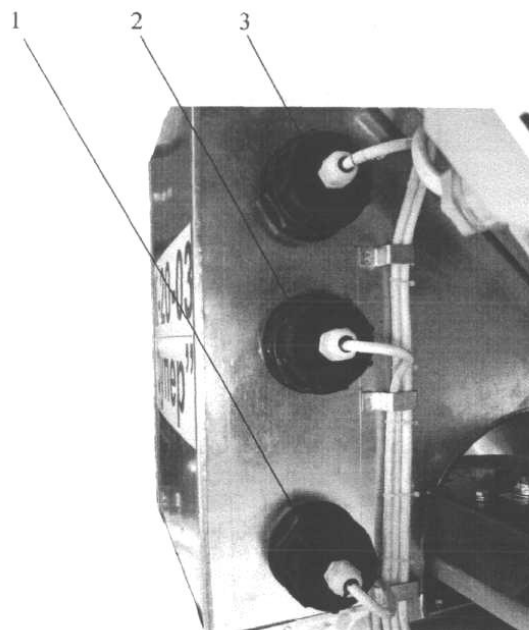
- а) режим налаштування – використовується для перевірки працездатності механізмів та електрообладнання;
- б) основний автоматичний режим "3 датч." – з використанням трьох сенсорів рівня (верхнього, середнього, нижнього);

в) допоміжний автоматичний режим "2 датч." – функціонує без середнього сенсора і застосовується при роботі з насінням високої сипучості.

У режимі "3 датч.": верхній сенсор відповідає за керування завантажувальним шнеком, середній активує привод подачі насіння, а нижній запускає дозатори насіння, рідини та розпилювач. При досягненні насінням відповідного рівня сенсори вмикають відповідні виконавчі механізми. Коли рівень насіння падає нижче нижнього сенсора, відбувається автоматична зупинка процесу протруювання – припиняється подача і насіння, і робочої рідини, проте завантаження бункера триває.

У режимі "2 датч.":

- верхній сенсор керує завантажувальним шнеком;
- нижній сенсор одночасно керує роботою всіх основних вузлів: дозаторами, розпилювачем, системою самохідної подачі.



1 – нижній; 2 – середній; 3 – верхній
Рисунок 2.1 – Датчики керування

У стандартному автоматичному режимі з трьома датчиками при запуску комплексу спочатку активуються електроприводи завантажувального і вивантажувального шнеків та насосної установки. Контрольні індикатори не

горять. Коли рівень насіння досягає нижнього сенсора, автоматично вмикаються дозатори насіння, рідини і розпилювач, що запускає процес протруювання.

Зі зниженням рівня насіння нижче відповідного сенсора відповідна частина системи тимчасово деактивується. Так, при зниженні нижче верхнього сенсора продовжується завантаження, нижче середнього – активується система подачі, а нижче нижнього – зупиняється дозування та обробка, але насіння продовжує надходити в бункер.

Контрольні лампочки повідомляють про заповнення до певного рівня: при досягненні нижнього сенсора – загоряється лампочка "Нижній датчик", середнього – "Середній датчик", верхнього – "Верхній датчик".

У допоміжному автоматичному режимі "2 датч." система працює подібно, але без участі середнього сенсора. Це забезпечує простіше керування в умовах, коли використовується легко сипучий матеріал.

Система керування та контрольні прилади.

Система керування забезпечує реалізацію технологічного процесу протруювання, тоді як контрольні прилади слугують для моніторингу та оцінки роботи протруювального обладнання. До складу керувальних елементів входять різноманітні перемикачі та крани, положення ручок яких схематично подано на рисунку 2.2. Контроль за робочими параметрами здійснюється за допомогою мірної ємності, насінневого бункера, шкал дозаторів насіння і рідини, а також індикаторних ламп, розміщених на панелі керування.

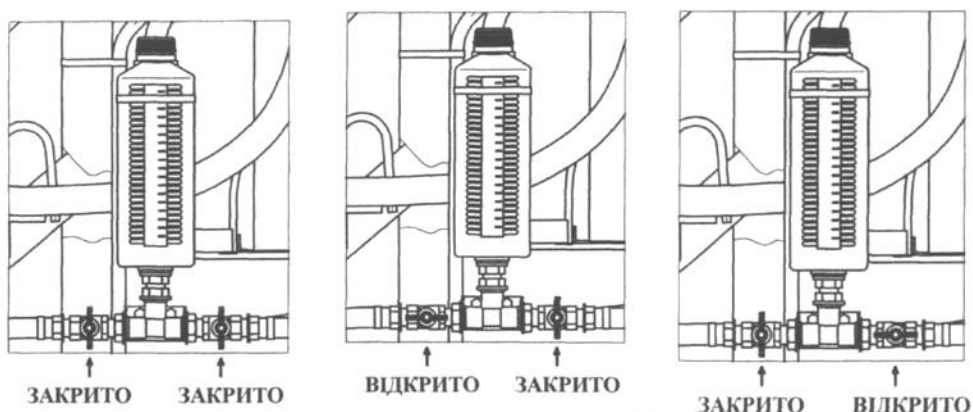


Рисунок 2.2 – Встановлення положень органів керування

Перед початком експлуатації протруювального обладнання необхідно здійснити ретельну перевірку його технічного стану. Особливу увагу слід приділити цілісності та надійності всіх з'єднань і кріпильних елементів. Також варто впевнитися в правильності підключення електропроводки до пульта керування, адже від цього залежить стабільність роботи систем автоматичного регулювання. Проведення такої перевірки є запорукою безпечної та безперебійної роботи машини в процесі обробки насіння.

2.3 Визначення умов витікання насіння з випускного отвору бункера-накопичувача

Технологічні властивості насіння є визначальним чинником при проектуванні та оптимізації конструкцій для їх зберігання й подачі. Під такими властивостями маються на увазі ті фізико-механічні характеристики, які безпосередньо впливають на поведінку насіння під час витікання з отвору бункера. Ці характеристики зумовлюють умови зберігання, інтенсивність подачі, а також рівномірність потоку, що вкрай важливо для подальших етапів технологічного процесу.

Важливу роль відіграє геометрія насіння, що може варіюватися від сферичної і еліпсоїдної до бобоподібної чи пірамідальної. Геометричні параметри — довжина, ширина та товщина — суттєво впливають на сипкість і щільність укладання матеріалу. Так, довжина зерен у зернових культурах зазвичай коливається в межах від 4 до 18,6 мм, тоді як у просапних культур — від 1,8 до 13,5 мм. Ширина та товщина насіння також змінюються залежно від виду: наприклад, у зернових ширина становить 1,4–4 мм, а товщина — від 1 до 4,5 мм; у просапних культур ці показники ширші — до 11,5 мм і 8 мм відповідно.

Форма і розміри насіння в комплексі з його фрикційними властивостями визначають ступінь тертя між зернами та поверхнями бункера, що безпосередньо впливає на стабільність витікання та ймовірність утворення заторів. Важливим також є показник щільності насіння, що відображає масу одиниці об'єму. Для сільськогосподарських культур цей параметр коливається в межах 1–1,4 т/м³. Щільність залежить не лише від розміру зерна, а й від внутрішньої будови – зокрема, наявності повітря в ендоспермі та ступеня вологості.

Окремої уваги заслуговує абсолютна маса, що визначається як маса 1000 зерен і є важливим критерієм при оцінці якості насіння, особливо в галузі насінництва. Наприклад, цей показник становить від 20 до 42 г для зернових, від 150 до 300 г – для кукурудзи, 100–200 г – для гороху, тоді як у проса та гречки цей параметр значно нижчий.

Ще один суттєвий показник – об'ємна маса, або натура насіння, – виражається як маса насіння в одному літрі об'єму. Цей параметр відображає щільність укладання та впливає на заповнення ємностей. Залежно від культури натура змінюється в межах: 400–565 г/л для вівса, 750–880 г/л для озимої пшениці, 700–865 г/л – для кукурудзи. Значення натури обумовлюється поєднанням абсолютної маси зерна і коефіцієнта його укладання, який визначається як відношення фактичної маси до теоретично можливого об'єму насипу.

Ці параметри мають вирішальне значення при проєктуванні конструктивних елементів систем зберігання та висіву. Зокрема, при розрахунках норми висіву насіння необхідно враховувати як абсолютну масу, так і натуру, оскільки перерахунок з кількості зерен на площу (шт/га) у масу (кг/га) напряму залежить від цих характеристик. Таким чином, глибоке розуміння фізико-механічних властивостей насіння дозволяє забезпечити ефективне проєктування бункера-накопичувача і передбачити поведінку насипу під час експлуатації.

Однією з важливих характеристик, що визначає придатність насіння до механізованої обробки, є його міцність. Цей показник встановлюється шляхом визначення зусиль, за яких починається травмування насіння, що негативно позначається на його схожості та, відповідно, на майбутній врожайності. Наприклад, для насіння таких культур, як бавовник і соя, цей показник становить 49...52 Н, а для кукурудзи – в межах 49...59 Н. Ці значення необхідно враховувати під час конструювання робочих органів та визначення оптимальних режимів їх функціонування, аби запобігти пошкодженню насіння під час контакту з конструктивними елементами машини.

Пружні властивості насіння описуються через коефіцієнт відновлення при ударі, який є відношенням нормальних швидкостей насіння до і після зіткнення з твердою поверхнею. Цей коефіцієнт дає змогу оцінити здатність насіння до збереження кінетичної енергії після удару, і, наприклад, для гороху його значення коливається в межах 0.30–0.42. Подібні зіткнення відбуваються під час різних технологічних процесів, зокрема при падінні насіння в бункер, що слід враховувати при розрахунках і моделюванні.

Фрикційні властивості насіння також мають важливе значення. Основним видом тертя є тертя ковзання, величина якого зазвичай незначна, але все ж впливає на характер руху частинок. Динамічний коефіцієнт зовнішнього тертя для насіння пшениці, ячменю і кукурудзи становить 0.3...0.5. Він співвідноситься зі статичним коефіцієнтом за формулою

$$f_o = (0.6...0.7) f_{cm}. \quad (2.1)$$

Крім того, існує поняття внутрішнього тертя, що є характерним для сипучих матеріалів. Його величина, разом із кутом природного відкосу, який залежить від вологості насіння, дозволяє передбачити стійкість насипу. Наприклад, при підвищенні вологості пшеничного зерна з 11–12% до 14–15%, кут природного відкосу збільшується з 34° до 37°, що свідчить про зростання опору зсуву всередині зернової маси.

Усі згадані параметри впливають на умови витікання насіння з бункера. В рамках нашого дослідження основне завдання полягає у визначенні мінімального діаметра отвору, який забезпечить безперешкодне висипання насіння. Відповідно до досліджень професора А. Н. Семенова, процес висипання насіння через отвір проходить у кілька етапів. Спершу витікають нижні шари, а рівень насипу опускається рівномірно. Насіння при цьому орієнтується уздовж бокової осі у напрямку руху, а зона впорядкованого витікання поступово розповсюджується від отвору вгору. Витрата насіння q ($\text{см}^3/\text{с}$) на початковому етапі підкоряється закону витікання рідини

$$Q_I = \mu S \sqrt{2gh}, \quad (2.2)$$

де μ – коефіцієнт опору;

S – площа отвору, см^2 ;

h – висота стовпа насіння над отвором, см ;

g – прискорення вільного падіння, $\text{см}/\text{с}^2$.

Коли рівень насипу знижується до певної критичної висоти $h_{\text{кр}}$, над отвором формується динамічне склепіння у формі параболоїда, що забезпечує постійну висоту витікання. У такому режимі витікання визначається залежністю

$$h_1 = r_{np} / f', \quad (2.3)$$

де h_1 – висота склепіння, см ,

r_{np} – приведений радіус отвору (см), що дорівнює подвійному гідравлічному радіусу,

f' – коефіцієнт внутрішнього тертя, $f' = 0.44 \dots 0.57$.

Отримані залежності та параметри становлять основу для визначення раціональних геометричних характеристик отвору бункера, які гарантуватимуть

безперервне та ефективне витікання насіння без утворення заторів чи пошкоджень.

На другому етапі процесу витікання насіння через отвір бункера-накопичувача встановлюється стабільна витрата, яка розраховується за рівнянням

$$Q_{II} = 1.47 \lambda \lambda_1 S (r_{np} / f')^{0.5} \quad (2.4)$$

де λ і λ_1 – коефіцієнти витрати, які залежать від питомої ваги, щільності укладання, геометричних розмірів насіння та радіусу отвору. Згідно з дослідженнями професора А. Н. Семенова, для пшениці $\lambda = 1$, а $\lambda_1 = 0.68 \dots 0.93$.

Коли упорядкований процес витікання поширюється до найвищого шару насіння, внаслідок зміни напрямку руху зерен виникає вигин потоку – починається третя фаза. У цей момент насіння з периферійних ділянок починає переміщуватись до центра, скочуючись по стінках утвореної воронки під кутом природного відкосу. Така динаміка забезпечує безперервне надходження нових зерен до зони витікання. Проте через різницю в швидкостях центрального та бокових потоків формується поглиблення воронки, а також збільшується її діаметр через обвалення зерна з бокових шарів. Витрата насіння у цей період визначається наступним співвідношенням

$$Q_{III} = (1.47 k_{nl} S r_{np}^{0.25}) / f'^{0.5}. \quad (2.5)$$

Коли рівень насіння знижується до висоти склепіння, воно руйнується – розпочинається четверта стадія, яка супроводжується поступовим уповільненням витікання. Незважаючи на те, що для цього етапу також застосовується формула (2.5), через зменшення висоти склепіння h_0 витрата q знижується аж до нуля.

На п'ятій стадії витікання відбувається вже не через отвір, а шляхом стікання по скосу дна ємності. У підсумку спостерігається чітка послідовність руху зерна: спочатку з центральної частини – від нижніх шарів до верхніх, а потім – із бічних шарів у зворотному напрямку.

Аналіз рівнянь (2.2)–(2.5) демонструє, що об'ємна витрата насіння через отвір бункера практично не залежить від загальної висоти насипу над отвором. Значне зменшення потоку може виникнути лише в разі втрати стабільності склепіння або недостатньої товщини шару насіння на дні ємності. Найсуттєвішим чинником є площа поперечного перерізу вихідного отвору: чим вона більша – тим вищий потік.

Зменшення діаметра отвору може призвести до повної зупинки витікання насіння навіть у разі, коли його діаметр ще перевищує середній розмір зерна. Згідно з експериментами Семенова, висипання припиняється, коли виконується наступна умова

$$r_{kp} \leq 4\sqrt{b\delta} , \quad (2.6)$$

де $b\delta$ – середній поперечний розмір зерна. Для деяких культур ці значення приймаються такими: для пшениці – 2,2 мм, ячменю – 2,4 мм, кукурудзи – 3,2 мм.

Як приклад розглянемо овес, що має найбільші розміри серед поширених зернових культур. У цьому випадку мінімально допустимий діаметр отвору визначається як

$$r_{kp} \leq 4\sqrt{b\delta} \leq 4\sqrt{18.6 \cdot 3} = 30 \text{ мм.}$$

Таким чином, отвір бункера-накопичувача не може мати менший діаметр, ніж 30 мм, щоб уникнути блокування потоку насіння. Водночас це значення має бути адаптоване до потреб у продуктивності, тому в подальших розрахунках буде уточнено з урахуванням необхідної витрати.

3 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

3.1 Визначення основних параметрів бункера-накопичувача

За технічними можливостями комплексу нам необхідно підтримувати продуктивність висипання в межах $Q = 10$ т/год.

Переведемо отримане значення в секундну продуктивність по вівсу в ($\text{м}^3/\text{с}$)

$$Q = \frac{10000}{1000 \cdot 3600} = 2.778 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Скористаємося спрощеною формулою витрати на першому етапі (2.2) та за визначенням площі круга, отримаємо значення діаметра отвору

$$d_o = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \mu \sqrt{2gh}}}, \quad (3.1)$$

де μ – коефіцієнт опору, $\mu = 0.009$;

h – висота стовпа насіння, $h = 2.15$ м (прийнято конструктивно).

Підставляємо значення

$$d_o = \sqrt{\frac{4 \cdot 2.778 \cdot 10^{-3}}{3.14 \cdot 0.009 \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 2.15}}} = 0.246 \text{ м}.$$

Отже, діаметр вихідного отвору повинен становити за критерієм продуктивності, не менше 246 мм, приймемо його 247 мм за внутрішнім діаметром існуючих транспортних трубопроводів.

Визначимо необхідні об'єми бункера накопичувача, його загальний об'єм повинен становити $V = 2.2 \text{ м}^3$.

Розрахуємо об'єм циліндричної частини

$$V_1 = \frac{\pi d_b^2}{4} l_1, \quad (3.2)$$

де d_b – прийнятий внутрішній діаметр бункера, $d_b = 1.24 \text{ м}$; l_1 – довжина циліндричної частини бункера, $l_1 = 1.93 \text{ м}$.

Тоді

$$V_1 = \frac{3.14 \cdot 1.24^2}{4} 1.6 = 1.93 \text{ м}^3.$$

Об'єм конусної частини бункера

$$V_2 = V - V_1. \quad (3.3)$$

Визначаємо об'єм

$$V_2 = 2.2 - 1.93 = 0.27 \text{ м}^3.$$

Звідси висота конусної частини бункера

$$H_2 = \frac{3 \cdot V_2}{\pi \left(\left(\frac{d_b}{2} \right)^2 + \frac{d_b}{2} \cdot \frac{d_0}{2} + \left(\frac{d_0}{2} \right)^2 \right)}. \quad (3.4)$$

Визначаємо

$$H_2 = \frac{3 \cdot 0.27}{\pi \left(\left(\frac{1.24}{2} \right)^2 + \frac{1.24}{2} \cdot \frac{0.247}{2} + \left(\frac{0.247}{2} \right)^2 \right)} = 0.542 \text{ м.}$$

За отриманими значеннями викреслюємо кут конуса та конусну частину бункера в цілому, рис. 3.1.

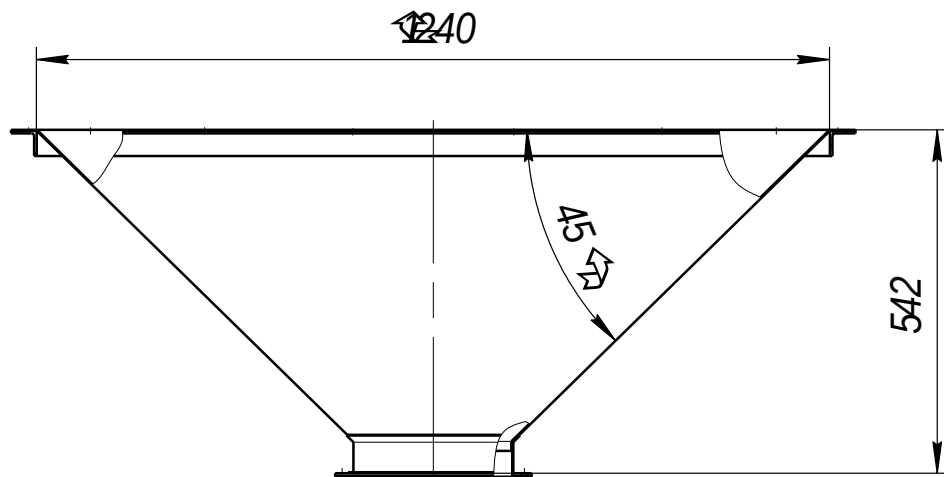


Рисунок 3.1 – Конусна частина бункера

Кут скосу стінок прийнятий 45° з міркувань виконання раціональної конструкції і це не суперечить максимальному куту тертя, який може виникати між насінням і матеріалом бункера.

3.2 Аналіз напруженого стану оболонки бункера

Слід акцентувати увагу на важливій особливості задачі розрахунку резервуара: при виведенні формул для напружень не було необхідності детально аналізувати геометричні параметри або матеріальні властивості оболонки. Це вказує на те, що задача має характер статично визначеної. Такий

результат став можливим завдяки допущенню про сталість напружень по товщині оболонки, тобто було прийнято, що вони не змінюються у напрямку нормалі до поверхні.

Як уже згадувалося, розглядаються два головні напруження – меридіональне та кільцеве. Третє головне напруження, перпендикулярне до поверхні оболонки, виникає на поверхні, де прикладений тиск (зовнішній чи внутрішній). Воно дорівнює значенню тиску p на цій поверхні, тоді як на протилежній поверхні – нульове. У випадку тонкостінних оболонок ці нормальні напруження є суттєво меншими за меридіональне і кільцеве, тому ними в розрахунках часто нехтують.

Виходячи з цього, вважаємо, що оболонка перебуває у стані плоского напруження. Для оцінки міцності конструкції необхідно обрати відповідну теорію міцності, що відповідає фізико-механічним властивостям матеріалу. Якщо скористатися четвертою теорією міцності (теорією Мізеса), тоді умова міцності має вигляд

$$\sigma_{ексIV} = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_t^2 - \sigma_m \sigma_t} \leq [\sigma]. \quad (3.5)$$

У нашому випадку розглядається бункер-накопичувач, повністю заповнений сипучим насінням, що зображено на рис. 3.2.

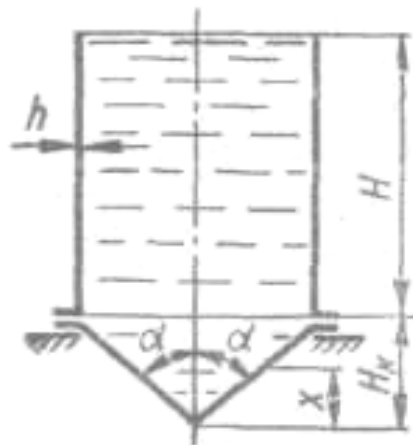


Рисунок 3.2 – Теоретична модель бункера-накопичувача

З урахуванням умов моделі можна записати формули для максимальних напружень. При цьому перевіримо допустимість геометричних параметрів:

$$\frac{H_k}{3} = \frac{0,55}{3} = 0,183 \text{ м}, H = 1,6 \text{ м},$$

отже,

$$H > \frac{H_k}{3}.$$

Тоді максимальне меридіальне напруження в стінці днища при $x = H_k$ буде

$$\sigma_{\max} = \frac{\gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2h \cos \alpha} \left(H + \frac{H_k}{3} \right) H_k. \quad (3.6)$$

Значення напруження

$$\sigma_{\max} = \frac{10000 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ}{2 \cdot 0.001 \cos 45^\circ} \left(1.6 + \frac{0.55}{3} \right) 0.55 = 6.9 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Проміжні значення напружень в бункері.

Тангенційні напруження, рис. 3.3

$$\sigma_t = \frac{\gamma \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha}{h \cos \alpha} (H + H_k - x); \quad (3.7)$$

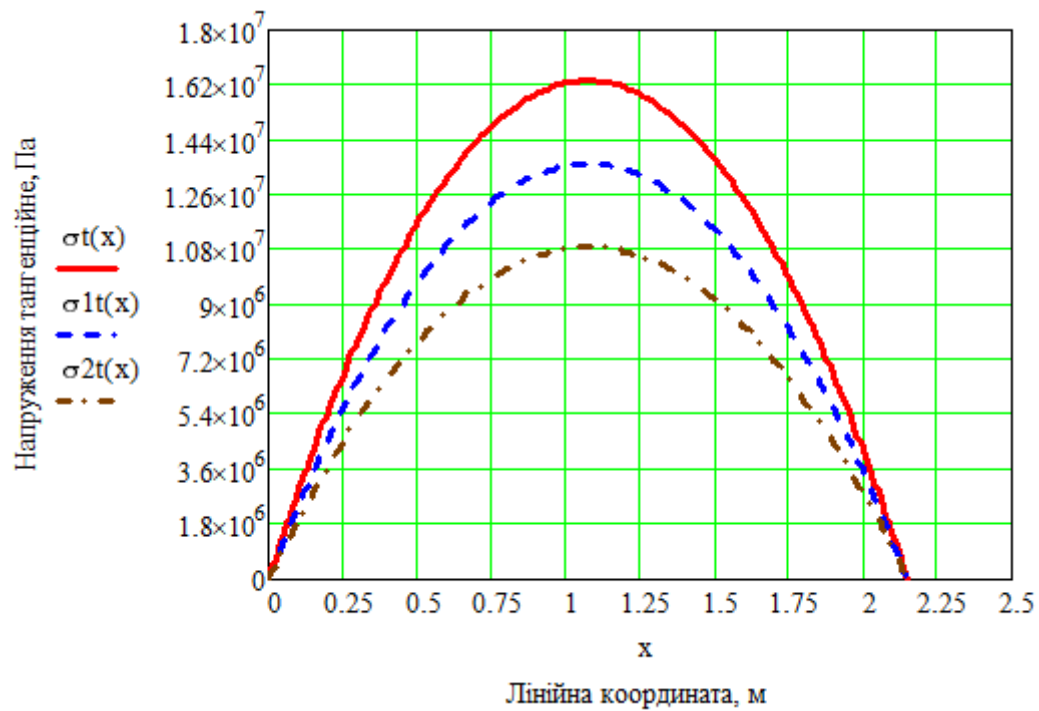


Рисунок 3.3 – Розподіл тангенційних напружень в стінці бункера при табулюванні товщини стінки: $h = 1.0; 1.2; 1.5$ мм

Це значення відповідає максимально допустимим експлуатаційним навантаженням. Подальший аналіз включає визначення проміжних значень напружень у різних зонах оболонки бункера, що дозволяє забезпечити надійність та безпечність роботи конструкції за умов повного заповнення насінням.

Тангенційні напруження, що виникають у стінці бункера внаслідок внутрішнього тиску від сипучого матеріалу, мають суттєве значення для забезпечення конструкційної міцності оболонки. Вони визначаються за формулою (3.7).

Визначимо ще меридіальні напруження, їх закони зміни, рис. 3.4.

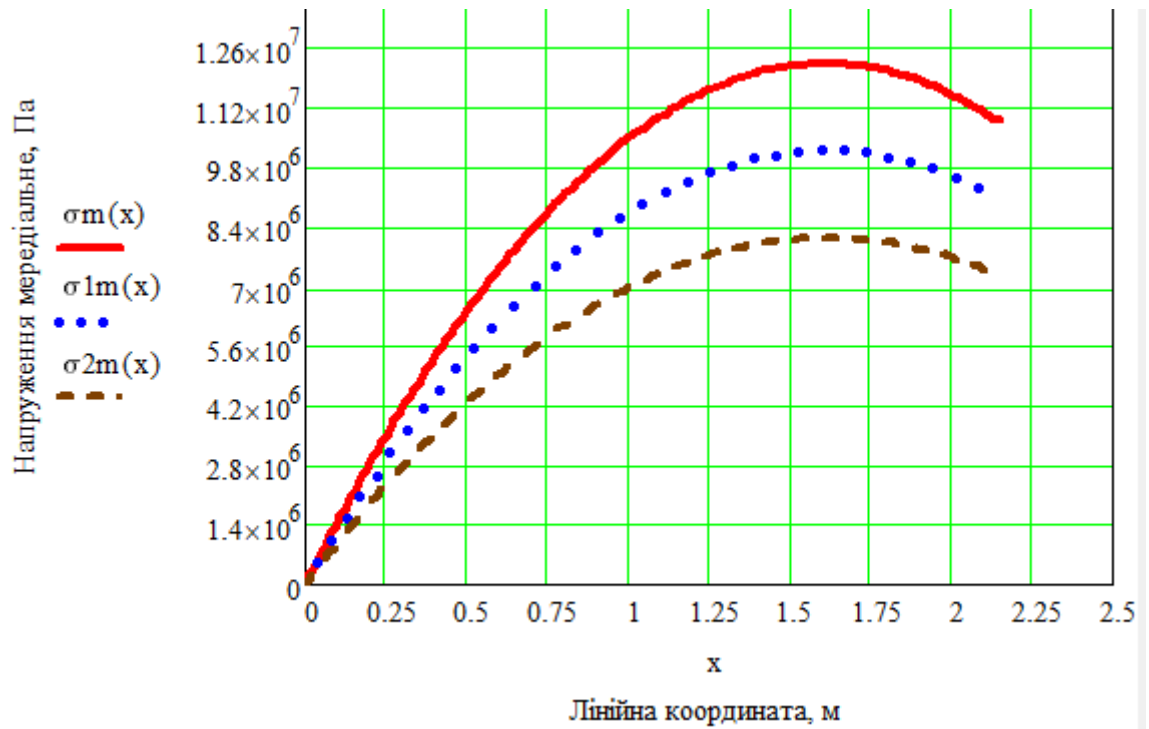


Рисунок 3.4 – Розподіл меридіальних напружень в стінці бункера при табулюванні товщини стінки: $h = 1.0; 1.2; 1.5$ мм.

За цим критерієм всі аналізовані товщини стінки підходять.

Кінцевий висновок по міцності дозволить зробити визначення еквівалентних напружень, застосувавши IV теорію міцності, формула (2.20), рис. 3.5.

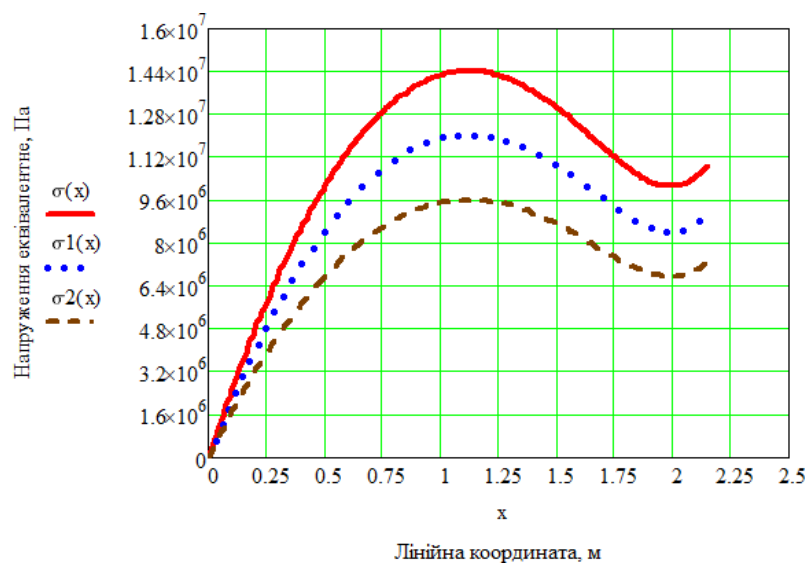


Рисунок 3.5 – Розподіл еквівалентних напружень в стінці бункера при табулюванні товщини стінки: $h = 1.0; 1.2; 1.5$ мм

На основі наведеного аналізу видно, що всі табульовані варіанти товщини стінки здатні витримувати навантаження при повному заповненні бункера насінням. Однак з урахуванням результатів щодо тангенційних напружень, товщина 1 мм виявилася недостатньою, що ставить під сумнів її надійність.

З огляду на це, приймається конструктивне рішення щодо мінімально допустимої товщини стінки бункера-накопичувача. З урахуванням запасу міцності та експлуатаційних вимог, раціональним є вибір товщини стінки не менше ніж 1,2 мм.

3.3 Розрахунок болтового з'єднання для кріплення конусної частини бункера

Під час проектування вузла з'єднання конусної частини бункера з циліндричною необхідно забезпечити не лише герметичність і надійність з'єднання, а й відповідність його елементів умовам міцності. На початковому етапі розрахунку визначається навантаження, яке повинне сприймати болтове з'єднання. З метою рівномірного розподілу силової дії, болти розміщуються рівномірно по колу. Враховуючи товщину стінки, у першому наближенні передбачається використання 16 болтів. Далі виконується розрахунок необхідного діаметра болтів.

Загальне навантаження, що припадає на болтове з'єднання, включає в себе масу насіння в конусній частині, а також вагу самої цієї частини. Таким чином, повна сила, що діє на з'єднання, визначається як

$$F_0 = G_H + G_k, \quad (3.8)$$

де G_H – вага насіння,

$$G_H = V \cdot \gamma, \quad (3.9)$$

G_k – вага конусної частини бункера, $G_k = 400$ Н

$$G_H = 2.2 \cdot 10000 = 22000 \text{ Н};$$

тоді сумарне навантаження на болти

$$F_0 = 22000 + 400 = 22400 \text{ Н.}$$

Умова забезпечення міцності болта при дії осевого розтягувального зусилля формулюється у такому вигляді.

$$\sigma_p = \frac{F_0}{nA} \leq [\sigma]_p, \quad (3.10)$$

де F_0 – осеве зусилля, яке необхідно забезпечити., $F_0 = 22400$ Н;

n – кількість болтів, $n = 16$.

A – площа поперечного перерізу болтового стержня

$$A = \frac{\pi d_1^2}{4},$$

тут d_1 – найменший діаметр стержня болта, $d_1 = 8.16$ мм для прийнятих болтів М10,

тоді площа

$$A = \frac{3.14 \cdot 8.16^2}{4} = 52.27 \text{ мм}^2;$$

$[\sigma]_p$ – допустиме напруження розтягу болта, $[\sigma]_p = 70$ МПа.

Підставляємо значення у формулу (2.25)

$$\sigma_p = \frac{22400}{16 \cdot 52.27} = 26.8 \text{ МПа.}$$

Таким чином, критерій міцності в даному випадку задовольняється. Однак, окрім осьового розтягувального навантаження, болт також піддається дії крутного моменту, який виникає під час затягування гайки, тобто

$$T = T_{sp} + T_{sT}, \quad (3.11)$$

де T_{sp} – момент тертя, що виникає у різьбі під час загвинчування гайки, розраховується за наступною формулою

$$T_{sp} = \frac{\frac{F_0}{n} d_2 \operatorname{tg}(\psi + \varphi')}{2}, \quad (3.12)$$

де d_2 – середній діаметр різьби, $d_2 = 9.03$ мм;

φ' – зведений кут тертя у різьбі;

ψ – кут підйому витків різьби, обчислений по середньому діаметру, у розрахунках знаходять за такою формулою

$$\operatorname{tg} \psi = Pz / (\pi d_2), \quad (3.13)$$

де P – крок різьби, $P = 1.5$ мм;

z – число заходів різьби.

Кут підйому витків різьби визначається наступним чином

$$\psi = \operatorname{arctg} \left(\frac{1.5 \cdot 1}{3.14 \cdot 9.03} \right) = 0.053 \text{ рад або } \psi = 3.04^\circ.$$

Обчислимо зведений кут тертя φ' у різьбі, який визначається відповідно до такого співвідношення

$$\operatorname{tg} \varphi' = F_s / (F_n \cos \delta) = f / \cos \delta, \quad (3.14)$$

де F_s – сила тертя,

$$F_s = F_n f, \quad (3.15)$$

де F_n – нормальна до робочої поверхні витка;

f – коефіцієнт тертя, $f = 0.08$.

У підсумку, загальне значення моменту загвинчування визначається на основі формули (3.12). Отримані розрахункові дані дають змогу оцінити відповідність обраного болтового з'єднання вимогам експлуатації, враховуючи не лише дію осьового розтягувального зусилля, але й вплив моменту тертя. Застосування такого комплексного підходу при конструюванні забезпечує високу надійність та тривалий термін служби з'єднувального вузла між конічною частиною бункера та основною рамою конструкції.

Нормальна сила F_n , яка діє перпендикулярно до робочої поверхні витка різьби, утворює в місці контакту гайки та гвинта силу тертя F_s . Компонента нормальної сили $F_n \cos(\delta)$ разом із силою тертя створюють результуючу силу F_0 , яка діє в дотичній площині середнього циліндра гвинта.

Для гвинтових з'єднань із трикутним або трапецеїдальним профілем різьби, при незначних кутах підйому витків, кут δ можна приймати орієнтовно як $\delta \approx 15^\circ$, тобто $\sin(\delta) \approx 0,26$.

Згідно з формулою (3.14), зведений кут тертя φ можна визначити

$$\varphi' = \operatorname{arctg} \left(\frac{0.08}{\cos 30^\circ} \right) = 0.092 \text{ рад}$$

або

$$\varphi' = 5.27^0.$$

Тоді момент сили тертя в різьбі T_{sp} при загвинчуванні гайки за формулою (3.12)

$$T_{sp} = \frac{\frac{22400}{16} \cdot 9.03 \operatorname{tg}(3.04^0 + 5.27^0)}{2} = 923 \text{ Нмм.}$$

Друга складова формули (3.11) T_{sT} – момент в торці гайки. Він визначається

$$T_{sT} = \frac{F_0}{n} f \frac{1}{3} \frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2}. \quad (3.16)$$

де D – діаметр вписаного кола у шестигранну гайку (розмір під ключ), $D=17$ мм;

d_0 – діаметр отвору під болт, $d_0=10,5$ мм.

Тоді

$$T_{sT} = \frac{22400}{16} \cdot 0.08 \frac{1}{3} \frac{17^3 - 10.5^3}{17^2 - 10.5^2} = 784.3 \text{ Нмм.}$$

Тоді повний момент (3.17)

$$T = 923 + 784.3 = 1707.3 \text{ Нмм.}$$

Напруження зсуву, що виникають під час процесу загвинчування

$$\tau = \frac{T}{W_p}, \quad (3.18)$$

де W_p – полярний момент інерції поперечного перерізу

$$W_p = \frac{\pi d_1^3}{16}, \quad (3.19)$$

значення

$$W_p = \frac{3.14 \cdot 8 \cdot 16^3}{16} = 106.63 \text{ мм}^3,$$

тоді дотичні напруження

$$\tau = \frac{1707.3}{106.63} = 16 \text{ МПа.}$$

Міцність болтового з'єднання визначається на основі еквівалентного напруження

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_p^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma], \quad (3.20)$$

де $[\sigma]$ – допустиме значення напруження оберемо таким, що не перевищує граничне допустиме напруження на розтяг, тобто $[\sigma] = 70 \text{ МПа}$.

Підставляючи значення, отримаємо

$$\sigma_E = \sqrt{26.8^2 + 4 \cdot 16^2} = 41.7 \text{ МПа.}$$

Допустиме еквівалентне напруження приймається не вище за $[\sigma] = 70 \text{ МПа}$. Отже, умова міцності повністю дотримана.

Таким чином, у болтовому з'єднанні спостерігається недонапруження, що забезпечує надійний запас міцності при статичних навантаженнях і середній

густині сипучого матеріалу, незалежно від його протруєного стану. На основі розрахунку остаточно приймаємо застосування 16 болтів М10 необхідної довжини для кріплення конусної частини бункера.

3.4 Розрахунок зварного з'єднання приєднувального фланця вихідної труби

З метою забезпечення надійного з'єднання вихідної труби з корпусом бункера-накопичувача виконується розрахунок зварного з'єднання приєднувального фланця. Схематичне зображення вузла представлено на рис. 3.1. Внутрішній діаметр труби становить 247 мм, а товщина стінки бункера приймається рівною 1,2 мм.

Для моделювання навантаження, яке сприймається фланцем, розглянемо ситуацію, коли нижній отвір перекрито, і вся маса заповненої насінням труби утримується на фланці. Таким чином, виникає сила розриву

$$F = \frac{\pi d_{mp}^2}{4} l_{mp} \gamma + G_{mp}, \quad (3.21)$$

де d_{mp} – діаметр труби, $d_{mp}=0,247$ м;

l_{mp} – загальна довжина труби, $l_{mp}=1,4$ м;

G_{mp} – вага труби, $G_{mp} = 250$ Н.

Встановлюємо значення

$$F = \frac{3,14 \cdot 0,247^2}{4} \cdot 1,4 \cdot 10000 + 250 = 920,5 \text{ Н.}$$

З'єднання точковим або шовним контактним зварюванням розраховують за напруженням зрізу.

Вважаємо, що навантаження на з'єднання є рівномірним, тоді умова міцності на зріз буде мати вигляд

$$\tau = \frac{4F}{\pi d^2 z i} \leq [\tau], \quad (3.22)$$

де z – число зварних точок, $z=16$;

i – число площин зрізу, $i=1$;

d – діаметр точки зварювання, $d=4$ мм;

$[\tau]$ – допустиме напруження зрізу.

З огляду на складну природу впливу численних факторів на міцність зварних з'єднань, а також умовний характер розрахункових залежностей, що застосовуються при їх аналізі, виникає необхідність у проведенні експериментальних досліджень для визначення допустимих рівнів напружень. Значення допустимих напружень визначаються з урахуванням якісних характеристик зварного з'єднання та особливостей силового навантаження, яке сприймають зварні шви.

Допустимі напруження для зварних швів, як правило, встановлюються у вигляді частки від допустимого напруження на розтяг для основного матеріалу. Для з'єднань, виконаних методом контактного зварювання, допустиме напруження на зріз можна представити у вигляді наступного виразу.

$$[\tau] = 0.5[\sigma]_p, \quad (3.23)$$

де $[\sigma]_p$ – напруження розтягу для основного матеріалу бункера - вуглецевої сталі

$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_m}{s}, \quad (3.24)$$

тут σ_m – напруження границі текучості матеріалу бункера, $\sigma_m = 250$ МПа;

s – коефіцієнт запасу міцності, $s = 1,5$.

Допустиме напруження розтягу

$$[\sigma]_p = \frac{250}{1.5} = 166.7 \text{ МПа.}$$

Тоді допустиме напруження зрізу становитиме

$$[\tau]' = 0.5 \cdot 166.7 = 83.4 \text{ МПа.}$$

Тоді умова міцності на зріз набуде таких значень

$$\tau = \frac{4 \cdot 920.5}{3.14 \cdot 4^2 \cdot 16 \cdot 1} = 4.6 \text{ МПа.}$$

Отже, умова міцності виконується, оскільки

$$\tau = 4.6 \text{ МПа} < [\tau]' = 83,4 \text{ МПа.}$$

Отже, результати проведеного розрахунку свідчать про те, що контактне точкове зварювання є достатньо ефективним і забезпечує міцність з'єднання фланця з корпусом бункера навіть у найгіршому випадку експлуатаційного навантаження. Приймається остаточно: кількість точок зварювання – 16, діаметр точки – 4 мм.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Ризики та аварійні ситуації, пов'язані з процесом протруювання насіння

Під час протруювання насіння виникають численні небезпечні ситуації, пов'язані з використанням хімічних речовин, експлуатацією технічних засобів та умовами праці. Використання токсичних протруйників, таких як фунгіциди та інсектициди, створює значний ризик для здоров'я працівників через можливе потрапляння хімічних речовин на шкіру, в дихальні шляхи або слизові оболонки. Контакт із концентрованими робочими розчинами або аерозолями може викликати гострі або хронічні отруєння, алергічні реакції та інші професійні захворювання. Крім того, аварійні розливи і випаровування робочих рідин становлять додаткову загрозу не лише для працівників, а й для навколишнього середовища.

Експлуатація протруювального обладнання пов'язана з ризиком механічних травм, що виникають у результаті контакту з рухомими частинами машин, такими як шнеки, насоси та дозатори. Неправильна експлуатація, відсутність захисних огорожень або порушення правил безпеки можуть призводити до защемлення кінцівок, падінь або інших травматичних випадків. Також існує ймовірність отримання електротравм через несправності електропроводки або порушення правил експлуатації електрообладнання. Під тиском робочої рідини можливий її випадковий викид, що може спричинити ушкодження шкіри або очей.

Важливою складовою небезпечних ситуацій є екологічні ризики, пов'язані з неправильною утилізацією або розливом протруйників. Забруднення ґрунтів і водних об'єктів токсичними речовинами призводить до порушення природних екосистем, накопичення шкідливих речовин у біоценозах та зниження якості навколишнього середовища. Крім того, неконтрольоване поширення аерозолів і летких компонентів хімікатів погіршує якість

атмосферного повітря. Для мінімізації цих ризиків необхідне дотримання відповідних технологічних норм, проведення моніторингу стану довкілля та застосування безпечних методів утилізації відходів.

Також слід враховувати психофізіологічні фактори, що впливають на стан здоров'я працівників під час тривалого перебування в умовах підвищеної вологості, температури та хімічного навантаження. Відсутність належного режиму праці і відпочинку, недостатнє забезпечення засобами індивідуального захисту сприяють виникненню професійного стресу, зниженню працездатності та розвитку хронічних захворювань.

4.2 Вимоги безпеки при роботі з протруювачем насіння

Протруювання насіння є важливим технологічним процесом у сільському господарстві, що забезпечує захист посівного матеріалу від патогенів і шкідників. Однак цей процес пов'язаний із використанням хімічних речовин, які можуть становити загрозу для здоров'я оператора, навколишнього середовища та безпеки виробничих операцій. Тому дотримання вимог безпеки під час роботи з протруювачем насіння є обов'язковою умовою ефективної та безпечної експлуатації обладнання.

Перш за все, основою безпечної роботи є дотримання чинних нормативних документів, серед яких слід виділити Державні санітарні норми та правила, державні стандарти, нормативи з охорони праці та пожежної безпеки. Ці документи регламентують правила поводження з хімічними препаратами, експлуатації сільськогосподарської техніки, а також заходи щодо охорони здоров'я працівників. Особливу увагу приділяють питанням інструктажу персоналу, використанню засобів індивідуального захисту, організації робочого місця, контролю технічного стану обладнання та правил поведінки у надзвичайних ситуаціях.

Для мінімізації ризиків при роботі з протруювачем насіння оператор повинен пройти спеціальне навчання та інструктаж з охорони праці, вивчити

інструкцію з експлуатації обладнання і ознайомитися з характеристиками використовуваних хімічних речовин, зокрема їх токсичністю, небезпеками для здоров'я та правилами першої допомоги при отруєннях. Наявність відповідних сертифікатів і допусків є необхідною умовою для допуску до роботи.

Використання засобів індивідуального захисту є невід'ємною частиною заходів безпеки. Оператор повинен користуватися захисним спецодягом, рукавичками, захисними окулярами, респіраторами або масками, що забезпечують захист дихальних шляхів від вдихання шкідливих парів та пилу. Особливо важливо не допускати попадання хімічних речовин на відкриті ділянки шкіри і слизові оболонки, що може викликати опіки, алергічні реакції чи інтоксикацію.

До початку роботи необхідно провести ретельний огляд технічного стану протруювача. Особливу увагу слід приділити перевірці герметичності шлангів і дозувальних пристроїв, цілісності електропроводки, справності запобіжних і контрольних приладів. Обладнання має бути встановлене на рівній, стійкій основі, а робоча зона повинна бути чистою, освітленою та захищеною від сторонніх осіб. Забороняється експлуатація обладнання при наявності несправностей або пошкоджень.

Під час роботи суворо забороняється проводити ремонтні чи регулювальні роботи без попереднього відключення протруювача від електроживлення. Не допускається залишати працююче обладнання без нагляду або допускати до нього осіб, які не пройшли відповідної підготовки. Такі заходи знижують ризик нещасних випадків та аварій.

Особливу увагу приділяють організації зберігання та використання хімічних протруйників. Вони повинні зберігатися в спеціально обладнаних приміщеннях із дотриманням вимог пожежної безпеки та обмеженням доступу сторонніх осіб. Контейнери з препаратами мають бути герметично закриті, з чіткими позначеннями про їхній вміст і дату придатності. Відпрацьовані упаковки підлягають утилізації відповідно до екологічних норм.

Важливо передбачити наявність аварійного запасу води та засобів для

негайного промивання шкіри, очей і дихальних шляхів у разі випадкового контакту з протруйником. Оператор повинен знати алгоритм дій при отруєнні або аварійному розливі робочої рідини, а також мати під рукою засоби першої допомоги.

Пожежна безпека є ще одним важливим аспектом. Оскільки багато протруйних речовин можуть бути горючими або токсичними при нагріванні, куріння, відкритий вогонь та іскри в зоні роботи суворо заборонені. Слід забезпечити наявність первинних засобів пожежогасіння і проводити регулярні навчання з пожежної безпеки.

Дотримання цих вимог сприяє не лише запобіганню аварій і травматизму, але й підвищенню ефективності технологічного процесу протруювання. Правильна організація робочого місця, своєчасне технічне обслуговування обладнання і усвідомлене ставлення оператора до безпеки створюють умови для стабільної роботи протруювального комплексу та збереження здоров'я працівників.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Головною метою виконаної роботи було вдосконалення конструкції бункера-накопичувача з метою зменшення навантаження на систему вивантаження за рахунок зниження частоти її запусків і зупинок. Оброблене насіння накопичується у бункері, звідки воно подається на подальше зважування та фасування. У разі потреби завантаження насіння навалом у великогабаритний транспорт, конструкція передбачає можливість перекриття живильного трубопроводу за допомогою заслінки та відкриття окремого рукава для прямої подачі. Такий підхід дозволяє працювати як з протруєним, так і з необробленим насінням.

В результаті розрахунку отримано наступне:

нижній отвір бункера-накопичувача не може бути менше 30 мм. Звичайно, отримане значення мінімального діаметра отвору повинно забезпечити ще й заплановану продуктивність, тому цей же діаметр визначатиметься з міркувань забезпечення поставленої продуктивності;

секундна продуктивність по вівсу як найбільшому за геометричними розмірами насінню $Q = 2.778 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$;

діаметр вихідного отвору повинен становити за критерієм продуктивності, не менше 246 мм, прийmemo його 247 мм за внутрішнім діаметром існуючих транспортних трубопроводів;

загальний об'єм бункера повинен становити $V = 2.2 \text{ м}^3$;

об'єм циліндричної частини $V_1 = 1.93 \text{ м}^3$, при $d_b = 1.24 \text{ м}$ прийнятому внутрішньому діаметрі бункера і $l_1 = 1.93 \text{ м}$ довжині циліндричної частини бункера;

об'єм конусної частини бункера $V_2 = 0.27 \text{ м}^3$;

висота конусної частини бункера $H_2 = 0.542 \text{ м}$.

Максимальне меридіальне напруження в стінці днища при товщині стінки 1 мм $\sigma_{m\max} = 6.9 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

Аналізуючи отримані значення тангенційних напружень у вигляді графіків, бачимо, що при товщині стінки бака 1 мм при звичайному конструкційному матеріалі перевищується межа допустимого напруження 160 МПа (максимальне 165 МПа). Значить за цим критерієм товщина стінки в 1 мм є досить небезпечною.

За еквівалентними напруженнями приймаємо, що товщина стінки бункера-накопичувача повинна становити не менше 1.2 мм.

Приймаємо для болтового з'єднання кріплення конусної частини бункера 16 болтів М10 необхідної довжини. Умова міцності повністю виконується. Недонапруження даного з'єднання ($\sigma_E = 41.7$ МПа) піде в запас міцності, оскільки розрахунок ведений в статиці та по середній густині протруєного чи непротруєного матеріалу.

Розрахунок зварного з'єднання приєднувального фланця вихідної труби констатує, що контактне зварювання вихідного фланця до основи бункера-змішувача є досить міцним. І тому остаточно приймаємо: кількість точок зварки – 16; діаметр точок контактної зварки – 4 мм.

В роботі у розділі «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» розглянуто питання: ризики та аварійні ситуації, пов'язані з процесом протруювання насіння; вимоги безпеки при роботі з протруювачем насіння.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Andreykiv O., Babii A., Dolinska I., Yadzhak N., Babii M. Residual lifetime prediction of field sprayer booms under the action of manoeuvre loading and corrosive environment. *Procedia Structural Integrity*. Volume 36, 2022, Pages 36-42.
2. Andrii Babii, Taras Dovbush, Nadiia Khomuk, Anatolii Dovbush, Anna Tson, Vasyl Oleksyuk, 2022. Mathematical model of a loaded supporting frame of a solid fertilizers distributor. *Procedia Structural Integrity* No 36. 203-210.
3. Andrii Babii, Bohdan Levytskyi, Taras Dovbush, Mariia Babii, Nadiia Khomuk, Anatolii Dovbush, Volodymyr Valiashek. Mathematical model of sprayer tank loading. *Procedia Structural Integrity*. Volume 59, 2024, Pages 609-616.
4. Babii A., Babii M. Taking impact of oscillation amplitude of boom sprayers load-bearing frame sections. *Scientific Journal of TNTU*. Tern. : TNTU, 2019. Vol. 95, No 3, P. 97–104.
5. Babii A.; Aulin V.; Babii M.; Levytskyi B. (2022) Investigation of the working capacity of the operating body suspension functional-transporting machine. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol 105, no 1, pp. 5–12.
6. Syrotyuk A.M., Babii A.V., Barna R.A., Leshchak R.L., Marushchak P.O. Corrosion-Fatigue Crack-Growth Resistance of Steel of the Frame of a Sprayer Boom. *Materials Science*, 2021, 56(4), P. 466–471.
7. Бабій А.В. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Конструкція, розрахунок і виробництво сільськогосподарських машин» для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» зі спеціалізацією «Машини сільськогосподарського виробництва» для здобуття освітнього ступеня «бакалавр» / А.В. Бабій. Вид–во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. 100 с.
8. Бабій А.В. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Сільськогосподарські машини: конструкції та розрахунок» для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 208 «Агроінженерія»

для здобуття освітнього ступеня «Бакалавр». Машини для заготівлі кормів. Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя. 2022. 76 с.

9. Бабій А.В., Бабій М.В. Організація і технологія механізованих робіт: навчальний посібник до курсового проєктування для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 208 «Агроінженерія» для здобуття освітнього ступеня «Бакалавр». Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя. 2023. 144 с.

10. Бабій А.В., Дзюра В.О., Головецький І.В. Дослідження впливу вертикальних коливань штанги обприскувача на рівномірність обприскування. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2022. Вип. 5(36)_І. С. 216-226.

11. Бабій А.В., Довбуш Т.А., Бабій М.В., Ткаченко О.І., Сташків М.Я. Динаміка машин. Навчальний посібник для студентів денної та заочної форм навчання спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування» та 208 «Агроінженерія» для здобуття освітнього ступеня «Магістр». Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя. 2023. 246 с.

12. Бабій А., Лещак Р., Барна Р. Корозійна тривкість сталі рами штангових обприскувачів у рідинному середовищі агрохімікатів. Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів: спец. вип. журналу „Фізико-хімічна механіка матеріалів”. № 13. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2020. С. 356–360.

13. Довбуш Т.А., Хомик Н.І., Бабій А.В., Цьонь Г.Б., Довбуш А.Д. Опір матеріалів: навчальний посібник до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2022. 220 с.

14. Желібо Є.П., Заверуха Н.М., Зацарний В.В. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник / За ред. Є.П. Желібо, В.М.Пічі. Львів: „Новий світ–2000”, 2002. – 328 с.

15. Заверуха Н.М. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник. Львів: „Новий світ–2000”, 2003. – 264 с.

16. Ільченко В.Ю., Нагірний Ю.П., Джолос П.А. Машиновикористання в

землеробстві. К.: Урожай, 1996. 384 с.

17. Керб Л. П. Основи охорони праці: Навч. пос. К.: КНЕУ, 2003. 215с.

18. Ластівка М.М. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник для здобувачів вищої освіти аграрних технікумів і коледжів зі спеціальності 208 Агроінженерія. Ладизинський коледж, 2019. 374 с.

19. Левицький Б.Б., Бабій А.В. Аналіз конструктивних особливостей мініобприскувачів для невеликих фермерських господарств. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39), ч.ІІ. С. 116-125.

20. Опір матеріалів. Під заг. ред. акад. АН УССР Г. С. Писаренко. К.:Вища школа, 1974. 304 с.

21. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунків деталей машин. К.: Вища шк., 1993. 556 с.

22. Протруювання насіння озимих зернових культур : веб-сайт. URL : <https://lnzweb.com/blog/protruuvanna-nasinna-ozimih-zernovih-kultur?srsId=AfmBOoqvVABhaLiJXJY3WgzITicq2oZxhfgxvByRALQboEl2SaljIt y8>.

23. Протруювач камерний ПКС-20. Інструкція з експлуатації. Львів. 2006. 60с.

24. Протруювач насіння шнековий ПСШ-20 : веб-сайт. URL : <https://agro-salon.com.ua/ua/goods/protruuyuvach-nasinnya-shnekoviy-pssh-20/>.

25. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку : навч. посіб. / за ред. Д. Г. Войтюка; авт. кол.: / Д.Г. Войтюк, С.С.Яцун, М.Я. Довжик. Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. 543 с.

26. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування: Підруч. для студ. вищ. навч. закл. із спец. «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва» / За ред. М.І. Черновола. Кн. 1: Машини для рільництва / П.В. Сисолін, В.М. Сало, В.М. Кропівний; За ред. М.І. Черновола. К.: Урожай, 2001. 384 с.

27. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція,

проектування: Підруч. для студ. вищ. навч. закл. із спец. «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва» / За ред. М.І. Черновола. Кн. 3: Машини та обладнання для переробки зерна та насіння / П.В. Сисолін, М.М. Петренко, М.О. Свірень; За ред. М.І. Черновола. К.: Фенікс, 2007. 432 с.

28. Хомик Н. І., Мартиню В. В., Бабій А. В., Цьонь Г. Б., Довбуш Т. А., Довбуш А. Д. Агрозахист: навчальний посібник за заг. ред. к. т. н., доц. Хомик Н. І. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. 520 с.

29. Хомик Н.І. Методичний посібник до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» / Н.І. Хомик, В.П. Олексюк , М.Я. Сташків, А.В. Бабій, Т.А. Довбуш. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. 106 с.

30. Шанайда В. В. Пакет MathCAD в інженерних розрахунках : навч. посіб. Тернопіль : ТДТУ, 2001. 163 с.