

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття рівня вищої освіти

магістр

на тему: «Вплив конструктивних параметрів бункера на рівномірність

византаження зерна»

КРМ.133ГМмд_21_02.000 ПЗ

Виконала: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою

«Машини і засоби механізації
сільськогосподарського

виробництва»

спеціальності 133 «Галузеве

машинобудування

ступеня вищої освіти» магістр

БОНДАТ Людмила

Керівник: к.с.н., професор

ЄПІАРА Надія

Полтава – 2026 року

ВСТУП

Актуальність теми. У більшості сільськогосподарських процесів, аграрних технологічних процесів, що охоплюють транспортування, обробку та зберігання сипких матеріалів, широко використовуються бункери різноманітних форм і габаритів. Особливо поширеними є конструкції з боковим випускним отвором, які застосовуються в повітряних і гратчастих сепараторах, дозувальних механізмах, млинах тощо. У порівнянні з осесиметричними моделями, такі бункери характеризуються більшою зручністю в експлуатації [1].

У складі технологічних ліній ці бункери повинні забезпечувати рівномірне надходження сипкого матеріалу вздовж усієї довжини випускного отвору, що є досить складним завданням. Крім того, часто виникає потреба в регулюванні швидкості витікання матеріалу з щілинних бункерів для оптимізації режиму роботи обладнання. В умовах сучасного виробництва досягнення рівномірного розвантаження та контроль витрати сипких речовин можливі завдяки двом основним підходам.

використання механізмів, що стимулюють рух зерна в бункері — таких як шнеки, вібратори, а також різноманітні живильні ваги, встановлені всередині; оптимізація форми та розмірів щілинного випускного отвору відповідно до конструктивних вимог.

У більшості випадків другий спосіб є кращим, тому що він виключає необхідність створення додаткового обладнання і не вимагає значних енерговитрат. Також за мінімальних механічних впливів на зерно їх травмованість зводиться до мінімуму.

Метою дослідження — підвищення рівномірності вивантаження пшениці з бункерів з випускним отвором шляхом раціоналізації форми випускного отвору бункера.

Завдання дослідження:

— вивчити стан питання щодо технології приготування повнораціонних кормів та зробити аналіз основних відомих бункерів з щілинним випускним отвором;

- визначити теоретичну залежність, яка встановлює взаємозв'язок між параметрами бункера, фізико-механічними властивостями зернового матеріалу та швидкістю його закінчення;
- виконати теоретичні та експериментальні дослідження процесу використання бункера випускним отвором раціональної форми;
- розробити практичні рекомендації щодо реалізації результатів роботи.

Об'єкт дослідження: робочий процес витікання пшениці із щілинного бункера з випускним отвором.

Предмет дослідження: аналітичні та експериментальні закономірності вивантаження пшениці із бункерів із випускним отвором під дією сил гравітації.

Методика досліджень: теоретичні дослідження процесу вивантаження кукурудзи ґрунтувалися на основних положеннях теоретичної механіки, гідравліки та механіки сипучих матеріалів. Проведення експериментальних досліджень здійснювалося з використанням стандартних методик.

Наукова новизна:

- встановлений зв'язок мінімальної висоти випускного отвору, при якому починається стійке закінчення зернового матеріалу, з урахуванням геометричних параметрів бункера та фізико-механічних властивостей зерна;

Практична значимість та реалізація: обґрунтовано конструкцію та розроблено бункер з раціональною формою випускного отвору, що забезпечує рівномірне та стійке вивантаження зернового матеріалу.

1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Основи технології кормоприготування в умовах внутрішньогосподарського виробництва.

Тваринницька галузь у структурі сільського господарства є основним споживачем кормів, і саме від їхньої якості та збалансованості залежить продуктивність та економічна ефективність виробництва. Жоден окремих вид корму не здатний забезпечити повний комплекс необхідних поживних речовин, вітамінів та мікроелементів. Тому використання лише одного виду корму або невдаче поєднання компонентів у раціоні призводить до уповільнення росту та розвитку тварин, зниження їхньої продуктивності, а також до підвищення витрат на виробництво кожної одиниці продукції. У кінцевому підсумку це негативно впливає на рентабельність господарства та конкурентоспроможність продукції на ринку.

Показовим є приклад свинарства: порушення оптимального співвідношення поживних елементів у раціоні може знизити середньодобовий приріст маси тварин на 30–35%. Одночасно витрати кормів на виробництво одиниці продукції зростають приблизно на 50% [1]. Це свідчить про те, що навіть незначні відхилення у складі кормів здатні суттєво вплинути на кінцеві результати виробництва. У середньому витрати кормів на стримання 1 центнера молока перевищують витрати праці у 1,5 раза, виробництво яловичини — у 2,5 раза, свинини — у 2,0 раза, а продукції птахівництва — у 1,3 раза. Таким чином, кормова база є визначальним чинником у формуванні собівартості продукції тваринництва та її економічної ефективності.

У сучасних умовах розвитку аграрного сектору тваринницька галузь виступає ключовим споживачем кормових ресурсів, що визначає її економічну ефективність та конкурентоспроможність. Відомо, що у структурі раціонів великої рогатої худоби частка концентрованих кормів становить до 42%, тоді як у свинарстві цей показник сягає близько 80%, а у птахівництві — до 95% [2–4]. Така відмінність пояснюється специфікою

фізіологічних потреб різних видів тварин, їхнім різцем інтенсивності росту та продуктивності.

Важливим чинником формування собівартості комбікормів є вартість використаних компонентів. Саме тому економічно обґрунтованим є максимальне використання власної сировинної бази господарства — зерна зернових та олійних культур, білкових і мінеральних добавок. Це дозволяє знизити витрати на закупівлю готових кормів, забезпечити стабільність виробничого процесу та підвищити рентабельність. Ефективне функціонування тваринницької галузі неможливе без правильно організованої кормової бази, яка повинна відповідати принципам збалансованості за обмінною енергією, сухою речовиною та іншими поживними елементами.

Зостехнічні вимоги передбачають неухильне догримання нормативів щодо якості кормів, включаючи належну підготовку сировини та технологію виготовлення збалансованих комбікормів. Важливим є також оперативний контроль якості на всіх етапах технологічного процесу, що дозволяє своєчасно вносити корективи у роботу обладнання та забезпечувати стабільність кінцевого продукту. Такий контроль легко реалізується в умовах внутрішньогосподарських підприємств, де технологічні операції здійснюються безпосередньо на місці виробництва.

Істотним фактором, що визначає собівартість готових кормів, є технічні характеристики обладнання, що використовується у виробничих лініях. Для забезпечення ефективності виробництва комплектування обладнання слід виконувати за блочно-модульним принципом, що мінімізує допоміжні транспортні операції та забезпечує можливість швидкої зміни режимів роботи. Одночасно обладнання повинно відповідати вимогам ресурсоефективності та гарантувати необхідний рівень якості продукції.

Можливі варіанти отримання комбікормів у господарстві ілюструє структурна схема, розроблена авторами [5–7]. Вироблена у рослинництві

продукція включає насіння зернових і бобових культур, насіння олійних культур, зелені, грубі (сіно) та соковиті (сінаж, силос, коренеплоди) корми. Частина цієї продукції використовується для переробки на годувальні та кормові цілі, а відходи переробки (висівки, мучка, макухи) та готова продукція (трав'яне борошно) застосовуються у виробництві комбікормів.

Аналіз структурної схеми дозволяє виділити два граничні варіанти отримання комбікормів:

-перший варіант — придбання комбікормів, вироблених спеціалізованими підприємствами (комбікормовими заводами) із закуплених на ринку компонентів, за рахунок часткової реалізації власної продукції. Такий комбікорм може безпосередньо використовуватися як основний корм (наприклад, у птахівництві) або як складова повнораціонних кормосумішей для ВРХ.

-другий варіант — виробництво комбікормів безпосередньо у господарстві з максимальним використанням власної сировини та закупівлею лише відсутніх компонентів. У цьому випадку створюється кормоцех із повним набором технологічних ліній, що дозволяє виробити повнораціонні кормові суміші для різних галузей тваринництва.

Перший варіант характеризується простотою організації, але визначальним чинником є висока вартість закуплених комбікормів. Другий варіант забезпечує більшу гнучкість системи виробництва, можливість оперативного реагування на зміну потреб тваринництва та здешевлення кормів за рахунок вдосконалення технологічних процесів заготівлі та переробки власної сировини.

Таким чином, оптимізація кормової бази господарства передбачає не лише раціональне використання власних ресурсів, але й впровадження сучасних технологічних рішень у виробництві комбікормів. Це дозволяє досягти високих показників продуктивності тваринництва, знизити собівартість продукції та забезпечити стабільний розвиток аграрного підприємства.

1.2 Типові варіанти цехів та агрегатів для приготування кормо сумішей з використанням пшениці.

Прикладом можуть бути створені раніше цехи для виготовлення повноцінних комбікормів для свиней безпосередньо у господарствах та міжгосподарських об'єднаннях із зерна власного виробництва та промислових білково-вітамінних добавок – ОЦК-4, ОКЦ-4, ОКЦ-15, ОКЦ-30 та кормоцех на базі комплектів обладнання КОРК-15А і КЦК-3, що застосовуються на молочнотоварних фермах на 800–1200 корів і відгодівельних комплексах до 5000 голів. Комплекс обладнання цеху ОКЦ-4 продуктивністю 4 т/год [8–10] складається з окремих блоків [11]:

- дробильно-змішувального, який забезпечує накопичення вихідних компонентів (зерна і готових БМВД), їх дозування, подрібнення зернових, змішування з БМВД та видачу готового комбікорму;
- приготування білково-вітамінно-мінеральних домішок;
- рідких добавок для збагачення корму технічним жиром;
- гранулювання кормових сумішей.

До складу обладнання входить система автоматичного керування транспортними та дезувальними засобами для сипких компонентів, транспортні механізми та електрообладнання. Робота цеху здійснюється так. Зернові та промислові білково-вітамінні добавки послідовно надходять на вібросепаратор і магнітну колонку, після очищення від домішок накопичуються у відповідних бункерах дробильно-змішувального відділення. Сюди ж подається трав'яне борошно. Відповідно до рецептури за допомогою пневматично керованої машини (ПУМ-1) компоненти з кожного бункера подаються пневмотранспортом на порційні ваги. Сформована порція зернових надходить у дробарку, а подрібнене зерно накопичується у бункері над змішувачем. Після звільнення вагів у них відважуються порції білково-вітамінних добавок і трав'яного борошна, які також спрямовуються у бункер над змішувачем. Підготовлена за рецептом порція корму масою 500

кг висипається у змішувач, перемішується і готовий комбікорм надходить або на склад, або в оперативний бункер блоку рідких добавок, або на грануляцію. Кормоцехи КОРК-15А, КЦК-5-3, ЦПК-12 та їх модифікації продуктивністю 15–20 т/год [12] для виробництва кормових сумішей із грубих, соковитих і концентрованих кормів та рідких збагачувальних добавок на молочнотоварних фермах відрізняються складом обладнання, але зазвичай мають однакові технологічні лінії (рис. 1.1).

Рис. 1.1 – Технологічні лінії кормоцеху КОРК-15А-9

- прийому, накопичення, подрібнення і дозованої подачі грубих кормів, силосу, сінажу, зеленої маси, а також бульбоплодів;
- прийому, накопичення подрібнення і дозованої подачі концентратів;
- прийому, підготовки і дозованої подачі поживних розчинів (меляси, карбаміду, кухонної солі та ін.);
- прийому, підготовки і дозованої подачі мінеральних добавок;
- прийому, накопичення і дозованої подачі жому;
- збору, транспортування, змішування, доподрібнення, збагачення та видачі кормосумішей вологістю 65-70%.

Технологічний процес роботи подібного цеху здійснюється наступним чином. Солому (сіно) у розсипах чи тюках, траву, силос (сінаж) та жом із транспортних засобів вивантажують у лоток живильника відповідної лінії та дозовано подають на збірний транспортер [13]. Коренеплоди з транспортних засобів спрямовуються на лоток живильника коренебульбоплодів і далі у подрібнювач-каменевловлювач, де вони миються, очищуються від сторонніх включень та подрібнюються. Подрібнені коренеплоди з бункера-дозатора також надходять на збірний транспортер. Рідкі збагачувальні добавки, підготовлені на відповідній лінії, насосом-дозатором через систему трубопроводів подаються до форсунок, закріплених на корпусі змішувача кормів. Віддозовані компоненти збірним транспортером надходять у модернізований подрібнювач-змішувач ІБК-ЗА. Сюди ж із бункера-дозатора подаються концентровані корми. У змішувачі всі компоненти додатково подрібнюються, перемішуються і у вигляді готової кормосуміші вивантажуються у мобільні кормороздавачі, які доставляють її у тваринницькі приміщення [14].

Згодовування тваринам кормових сумішей, виготовлених у таких цехах, порівняно з окремим згодовуванням компонентів раціону, підвищує рентабельність виробництва молока на 4,4–13,6% завдяки зростанню продуктивності корів та зменшенню питомих витрат кормів. Разом із тим, обладнання цих цехів відзначається високою вартістю будівельної частини, значною енергоємністю, а безперервний режим роботи та висока продуктивність певною мірою обмежують можливість оперативної зміни технологічного процесу для виробництва кормів для окремих груп тварин. Використовуване об'ємне дозування компонентів не відповідає сучасним вимогам щодо точності, а однорідність отриманої кормосуміші (79–89%) залишається недостатньою [15].

Найкраще корми засвоюються при споживанні тваринами збалансованих за складом сумішей. До їх складу входять зернові (кукурудза, ячмінь, пшениця, овес, горох) та борошністі (висівки, мучка) компоненти, продукти переробки (шроти, макуха), корми тваринного походження (м'яса, рибна, м'ясокісткове борошно), продукти мікробіологічного синтезу (дріждж, амінокислоти), вітамінні (хвості борошно), мінеральні (сіль, крейда, фосфат), рідкі (меляса, кормовий жир, рослинча олія) та біологічно активні речовини. Основними структурними складовими комбікормів є зернові компоненти, частка яких сягає 60–70%.

Однією з ключових операцій технологічного процесу є дозування компонентів. Неточність дозування призводить до зниження кормової та біологічної цінності суміші, порушення балансу поживних речовин, а при надлишку дорогих компонентів – до зрощання кінцевої продукції. Особлива точність потрібна при виготовленні білково-вітамінно-мінеральних добавок і преміксів, адже навіть незначне відхилення від рецептури може мати серйозні наслідки. Для стримання збалансованої суміші необхідні дозуючі пристрої з похибкою не більше $\pm 0,1\%$, що забезпечується тензометричними системами зважування на базі тензорезисторних датчиків навантаження [16].

Вирішальним параметром, що визначає якість готового корму на заключному етапі, є однорідність суміші. Згідно зоотехнічних вимог, вона повинна становити не менше 90–95%, що має гарантувати застосовуване змішувальне обладнання. Підсумовуючи, слід відзначити, що особливості приготування концентратних комбікормів у внутрішньогосподарських підприємствах зумовлені специфікою господарства, наявною сировинною базою, необхідністю забезпечення різних видів і вікових груп тварин при суворому дотриманні нормативів щодо енергії, сухої речовини та інших поживних речовин. Це визначає головний принцип організації таких підприємств – комплектування технологічних ліній на блочно-модульній основі з технічних

засобів, що максимально відповідають вимогам ресурсозбереження та забезпечують належну якість виконання основних операцій і отримуваних кормів. Значною мірою цьому сприяє наявна технічна база, сформована як із промислового обладнання, що вже випускається, так і з нових розробок науково-дослідних та інших організацій, придатних для використання у складі технологічних ліній таких цехів [17].

1.3 Класифікація існуючих бункерів.

Бункер – це спеціальний резервуар або контейнер, призначений для тимчасового зберігання та подальшого відвантаження сипучих або рідких матеріалів [18].

Такі конструкції повинні мати достатню місткість, забезпечувати безпечні процеси навантаження та розвантаження, запобігати налипанню вантажу, а також сприяти його мінімальному подрібненню під час перевантаження та зберігання. Випускний отвір обладнується затворами та живильниками; його розмір у 3–5 разів перевищує найбільший шматок матеріалу. Об'єм бункера може бути від 40 до 150 м³, а продуктивність – 5–12 т/хв.

За функціональним призначенням розрізняють технологічні та накопичувальні бункери. Серед технологічних розрізняють такі [19]:

- приймальні – для прийому матеріалу при розвантаженні вагонів, скіпів, самоскидів;
- дозувальні – для регулювання подачі та подачі на конвеєр;
- зневоднюючі – для дренажного зневоднення продуктів збагачення;
- компенсуючі (демпфуючі) – для зрівнювання навантаження на технологічні пристрої;
- відвантажувальні – для накопичення та подальшого завантаження продуктів у залізничні вагони.

Дозувальні та складські бункери працюють у системі, що забезпечує накопичення сировини та її дозування перед технологічними процесами

(наприклад, збагаченням корисних копалин). За типом встановлення вони бувають стаціонарними, напівстаціонарними (термін служби до 1,5 років) та мобільними. За матеріалом виготовлення розрізняють залізобетонні (монолітні, збірні, комбіновані), металеві та змішані конструкції.

За формою бункери можуть бути прямокутними, круглими, стільниковими, щілинними або коритоподібними. Відносно рівня землі їх поділяють на підвісні та закопані. Розрізняють бункери безперервної та циклічної дії. У гірничих виробках як бункери використовуються виробки, а також передавальні воронки та напівбункери, які мають менші розміри та зазвичай не обладнані зазорами та живильниками. Вони використовуються для збору та зберігання сипучих матеріалів.

Бункерний вагон – це залізнична транспортна платформа з ланцюговим конвеєром внизу, призначена для переміщення гірської маси під час видобутку корисних копалин. Перша модель була створена в 1960 році у Швеції. Вантажопідйомність 15–25 т, швидкість до 20 км/год, ширина 1500 мм, висота завантаження 1200–1400 мм [20].

Бункер-живильник – це пристрій для рівномірної подачі гірської маси в систему безперервного транспортування. Поєднує циклічне обладнання з безперервним транспортуванням. Використовується як елемент гірничотранспортного комплексу або приймальної установки для подачі сировини у виробничі або заводські цехи. Складається з приймальної воронки та живильника. Типи: каретний, стрічковий, пластинчастий, вібраційний, скребковий, роликівий, шнековий, барабанний, відвального. За мобільністю – стаціонарний, напівстаціонарний та самохідний.

Бункер-навантажувач – це пересувний підземний механізм, що забезпечує завантаження транспорту гірничою масою. Використовується разом з комбайном та самохідним вагоном для підвищення швидкості видобутку. Має корпус з бортами та дволанцюговий скребковий нижній транспортер. Оснащений вентилятором для очищення повітря. У робочому положенні

зчеплений з комбайном та рухається разом з ним [21].

Підземний бункер – це гірничодобувна установка для короткочасного накопичення корисних копалин або гірських порід. Зазвичай його розташовують поблизу шахтного стовбура для забезпечення рівномірних підйомних робіт. Такі бункери також встановлюють у місцях зміни транспортних систем (з вагочетки на конвеєр). Механізовані підземні бункери збільшують пропускну здатність та надійність транспортування, компенсують нерівномірність надходження вантажів та вихід з ладу обладнання. Їх значення особливо зростає з впровадженням конвеєризації.

Бункерний поїзд – це підземна транспортна установка на рейках, що складається з секційних платформ з високими бортами. Він використовується для переміщення гірської маси з вибою за один робочий цикл. Він може бути скреперним та конвеєрним. Його використання значно скорочує час транспортування порівняно зі звичайним шахтним транспортом. Він розташовується поблизу камери з вагонетки-відкидачем, у нижній частині має дозувальну камеру з живильником для завантаження скіпа [22].

Акумуляційний бункер використовується для накопичення, зберігання та контролюваного вивільнення матеріалів, наприклад, звичайного вугілля або мінеральної сировини перед їх збагаченням. Таке накопичення забезпечує стабільність технологічних процесів. При збагаченні вугілля великомісткий накопичувальний бункер циліндрично-конічної або іншої форми називається силосом.

1.4 Коротка характеристика існуючих бункерів

Стаціонарні бункери зазвичай заповнюються та спорожнюються самопливом. Щоб уникнути утворення застійних зон при завершенні вивантаження, кут нахилу стінок і днища бункера має перевищувати кут, за якого починається самопливний рух матеріалу. Розмір випускного отвору повинен бути у 3-5 разів більший за умовний діаметр зерен сипучого

вантажу [23]. Бункери повинні відповідати таким вимогам: надійність процесів завантаження та розвантаження, відсутність злипання сипучого матеріалу між собою та зі стінками, мінімальне пошкодження вантажу. У випадку залипання сипучих матеріалів застосовують вібраційні, пневматичні або ланцюгові пристрої. Для виготовлення бункерів використовують листову сталь, залізобетон та деревину. Іноді застосовують дротяну сітку, обтягнуту щільною тканиною зсередини.

Металеві бункери відзначаються довговічністю при зберіганні сипких матеріалів. Вони мають відносно невелику масу та виготовляються індустріальним способом на заводах. Стандартні деталі монтуються безпосередньо на місці встановлення. Проте при зберіганні вологих вантажів стінки та днище піддаються корозії, що прискорює їх знос і збільшує коефіцієнт зовнішнього тертя. Залізобетонні бункери застосовують для зберігання як сухих, так і вологих матеріалів. Вони мають високу довговічність, але є дорогими у виробництві та значно важчими за металеві. Дерев'яні бункери використовуються рідко, вони недовговічні та потребують частого ремонту. Комбіновані бункери виготовляють із різних матеріалів. Наприклад, щоб зменшити знос у дерев'яних конструкціях, на днище укладають сталеві листи, або в залізобетонному корпусі встановлюють металеве днище. У таблиці 1.1 наведено класифікацію бункерів.

Таблиця 1.1 – Класифікація бункерів

Бункери		Геометрична форма		Схема
Тип	Група	корпуса	днища	
Круглі	Конічні	Конус	Конус	
	Циліндротчні	Циліндр	Конус	

Продовження табл. 1.1.

Бункери		Геометрична форма		Схема
тип	група	корпуса	днища	
Коритоподібні	Двосхилі трапецеїдальні	Чотирикутна призма	Дві трикутні призми	
	Пірамідальні	Призма	Горизонтальна площа	
П'ятикутні	Пірамідальні	Піраміда	Піраміда	
	Комбіновані	Призма	Піраміда	
Коритоподібні	Односхилі трикутні	Трикутна призма		
	Односхилі трапецеїдальні	Чотирикутна призма	Трикутна призма	

Об'єм бункера визначається режимом роботи технологічного процесу, і навіть обсягом подачі із транспортних засобів. За необхідності підтримки безперервної подачі сипучого вантажу встановлюють додаткові компенсатори.

Випускні отвори роблять різних форм: круглі, прямокутні, квадратні, щілинні, криволінійні. У бункері є затвор, призначений для періодичного дозування сипучого вантажу та регулювання струменя потоку.

Затвори повинні відповідати наступним вимогам: простота та надійність у конструкції та експлуатації, відсутність прокидання сипучого вантажу при закритому затворі, недопущення самовідкриття.

За типом приводу затвори бувають ручні та механічні з дистанційним керуванням. За способом дії затвори поділяють на відсікають струмінь вантажу і створюють підпір. У бункерах з бічним випускним отвором часто використовують затвори, що відсікають потік вантажу, у вигляді плоскої засувки.

Таке різноманіття бункерних пристроїв обумовлено різними завданнями, які ставить сучасне сільське господарство. Зокрема, незважаючи на простоту конструкції бункерів з бічним випускним отвором, застосування їх буває найрізноманітнішим. Під кожен задачу виробничого процесу потрібне й індивідуальне конструкторське рішення. Тому для підвищення рівномірності вивантаження сипучого матеріалу по всій довжині випускного отвору необхідно знати область застосування подібних бункерів.

Висновки до розділу

Аналіз робіт, присвячений питання дослідження рівномірності вивантаження зернового матеріалу з бункера по всій довжині його випускного отвору, дозволив визначити мету і завдання дослідження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вивчити стан питання.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1 Обґрунтування моделі зернового сипучого тіла.

Оскільки дослідний бункер має відносно невеликі габарити, виникла потреба створити модель подібності для перенесення результатів експериментальних випробувань, отриманих із використанням цих шнеків, на шнеки з іншими конструктивними параметрами. Для реалізації цього завдання застосовано метод подібності функціонування технічних систем, розроблений проф. Першиним В.А [24]. Основною характеристикою експериментального шнека виступає його об'ємна продуктивність Q , яка функціонально визначається зовнішнім діаметром D , діаметром вала d , кроком спіральної навивки h , частотою обертання та коефіцієнтом бункера, частотою обертання n_u і коефіцієнтом бункера k_s .

$$Q = f(D, d, h, n_u, k_s) \quad (2.1)$$

Користуючись методом нульових розмірностей залежності (2.1), отримано математичний вираз для визначення критерію подібності функціонування бункера по продуктивності:

$$\pi_Q = \frac{Q}{\Delta d_u^2 h n_u k_s}, \quad (2.2)$$

де $\Delta d_u = D - d$ - різниця діаметрів бункера і його вала.

Умови експерименту та результати експериментальних досліджень продуктивності Q дають можливість за рівнянням (2.2) розрахувати число подібності функціонування бункера по продуктивності.

Тобто, при значеннях параметрів експериментального бункера і показників експерименту $Q = 0,004 \text{ м}^3 / \text{хв}$; $D = 0,056 \text{ м}$; $d = 0,035 \text{ м}$; $h = 0,04 \text{ м}$; $k_s = 0,8$ маємо:

$$\pi_Q = \frac{0,004}{(0,056 - 0,035)^2 \cdot 0,04 \cdot 150 \cdot 0,8} = 1,9 \quad (2.3)$$

Припустимо, що при експериментальних дослідженнях фізичної моделі бункера було обґрунтовано раціональні значення, що входять у функціональну залежність (2.1) конструктивних і режимних параметрів і коефіцієнта k_3 . Приймаємо умову, що шнеки з іншими параметрами повинні функціонувати подібно експериментально відпрацьованому аналогу, а значить зберігається умова подібності їх функціонування [25]:

$$\pi_Q = idem = const = 1,9 \quad (2.4)$$

Розміри і продуктивність інших шнеків будуть співвідноситися з аналогічними даними по експериментальному шнеку в певних масштабах C_i . Поділивши складові виразу (2.2) для розглянутого і експериментального шнеків, і беручи до уваги умову (2.4), отримаємо індикатор подібності функціонування бункера за продуктивністю:

$$\frac{C_Q}{C_{\Delta d_u} C_h C_{n_u} C_{k_3}} = 1 \quad (2.5)$$

$$\text{де } C_Q = \frac{Q_p}{Q_s}; C_{\Delta d_u} = \frac{\Delta d_p^2}{\Delta d_s^2}; C_h = \frac{h_p}{h_s}; C_{n_u} = \frac{n_{шп}}{h_{шп}}; C_{k_3} = \frac{k_{3p}}{k_{3s}}$$

(б) і (є) вказують на залежність до розглянутого і експериментального шнеків. Індикатор (2.5) можна записати у вигляді:

$$C_Q = C_{\Delta d_u} C_h C_{n_u} C_{k_3}$$

Тобто, даний та експериментальний шнеки можуть або відрізнятися за продуктивністю $C_Q = m$, або мати однакову продуктивність $C_Q = 1$ при різних значеннях параметрів конструкції, режиму роботи і коефіцієнта завантаження. Значить в першому випадку маємо модель (з урахуванням умови (2.5)).

$$\begin{cases} C_Q = C_{\Delta d_u} C_h C_{n_u} C_{k_s} \\ C_Q = m \end{cases}, \quad (2.7)$$

У другому випадку модель має вигляд:

$$\begin{cases} C_{\Delta d_u} C_h C_{n_u} C_{k_s} = 1 \\ C_Q = 1 \end{cases}, \quad (2.8)$$

Система залежностей (2.1) - (2.6) описує умову подібності функціонування розглянутого і експериментального шнеків, а система залежностей (2.1) - (2.8) є узагальненою моделлю подібності функціонування по об'ємній продуктивності.

Модель може бути використана при вирішенні поставленого завдання (переведення результатів експерименту на інші типорозміри шнеків). Крім цього, модель може бути використана при проектуванні шнеків з різною продуктивністю $C_Q = m$ зі зміненими значеннями конструктивних параметрів і k_s , в межах твору масштабі рівного m , модель (2.7) або з тією ж продуктивністю $Q = 1$ з змінюю або постійністю окремих значень параметрів і k_s але в межах твору їх масштабів рівного 1 (рівняння (2.8)).

Методика вирішення першого завдання: використання результатів і умов експерименту на інші типорозміри шнеків.

Варіант при якому $C_Q = 1$.

1. Встановлюється склад і значення свідомо відомих показників і параметрів, що входять у вираз (2.2). Наприклад, коефіцієнт $\Delta d_u, k_s$ масштаби зміни

яких: $C_{k_s} = 1, \Delta d_u = 1$.

$$\pi_Q = \frac{Q}{\Delta d_u^2 n_u k_s}, \quad (2.9)$$

2. Встановлюється умова однозначності по змінному параметру.

Наприклад: $C_p = 2$.

3. З індикатора подібності (2.5) виводиться залежність для шуканого параметра $n_{ш}$:

$$C_{n_{ш}} = \frac{C_Q}{C_{\Delta d_{ш}} C_h C_{k_3}} \quad (2.10)$$

4. При підстановці значень масштабів і рішення (2.10), встановлюють значення масштабу $C_{n_{ш}} = 0,5$.

5. Враховуючи значень параметрів і показників базового експерименту і встановлених для них масштабів C_i , зміни обчислюють нові значення параметрів бункера, але з колишньою продуктивністю.

Варіант з $C_Q = m$.

Методика рішення знову аналогічна розглянутій за умови $C_{k_3} = 1$. Значення C_Q приймається будь-яким залежно від поставленого завдання.

Методика вирішення другого завдання: проектування бункера з об'ємною продуктивністю, що відрізняється від продуктивності базового бункера в C_Q разів, тобто $C_Q = m$.

В даному випадку, в якості базового бункера, приймається шнек злюбими ознаками, наприклад, високою енергоефективністю. Тобто, завдання вирішується переліком варіантів з перевіркою ефективності значень показників і параметрів з різними значеннями масштабів.

Як і розглянуто раніше, за відомою функціональної залежності, спочатку розраховується числове значення критерію подібності. Потім встановлюється (приймається необхідний, наприклад, за технічним завданням) значення вихідної характеристики, наприклад Q_v , і вирішується завдання з використанням залежностей, типу (2.2) і (2.5).

При проектуванні шнеків додатково до рівнянь (2.2) і (2.5) доцільно використовувати подоби залежності (наприклад, масова продуктивність) в якості вихідної характеристики, в якій була б або споживана потужність, або потужність на вихідному валу, або інший параметр. В цьому випадку враховується щільність сипучого або іншого матеріалу, вали опорів.

Висновки по розділу

Для оцінки відповідності результатів експериментальних досліджень теоретичним залежностям було застосовано експериментально-статистичний підхід із використанням методів математичної статистики та чисельного аналізу. Відтворюваність проведених експериментів перевірялася за допомогою критерію Кохрена.

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Експериментальне обладнання та прилади для вимірювань

При проведенні експериментальних досліджень були використані такі прилади та обладнання:

- бункер;
- фотоапарат;
- секундомір;
- сушильна шафа та екскатор для визначення вологості пшениці;
- ємність для визначення рівномірності вивантаження сипучого пшениці вздовж випускного отвору;

При проведенні експерименту використовувався секундомір, спрацьовування якого розпочиналося в момент відкриття заслінки. Це давало змогу збільшити точності вимірювання часу засінчення зернового матеріалу (пшениці) з бункера.

Секундомір автоматично вмикався кінцевим ьмкачем в момент відкриття заслінки бункера. Після повного спустошення бункера фіксувався час з наступним зберігання даних вимірювань.

Фотоапарат використовувався для фіксації процесів, що відбуваються в бункері.

Штангенциркуль використовувався при визначенні розмірів випускного отвору та розмірів зернинок сипучого матеріалу.

Результати експериментальних даних зберігають

Установка для проведення експерименту (рис. 3.2) призначена для вивчення процесу закінчення сипких матеріалів у бункерах з бічним поданням зернового матеріалу.

Рисунок 3.2 – Схема експериментальної установки

Методика проведення та аналізу експериментальних досліджень була взята з наукових джерел [12–15]. Експериментальна установка (рис. 3.2) являє собою модель бункера, де дві бокові стінки виконачі зі скла, а решта — зі сталі, що дає можливість здійснювати візуальний контроль процесів усередині. Передня рухома стінка може закріплюватися на різних висотах відносно основи, це дозволяє регулювати площу вихідного отвору. Днище конструкції шарнірно з'єднане із задньою стінкою, завдяки чому можна змінювати кут нахилу відносно горизонтальної площини. У ході експериментів використовували кути нахилу стінок: 20° , 30° , 37° , 45° , 53° та 60° .

Конструкція установки у вигляді зверху подібна до попередньої, проте має відмінність: одна бокова стінка зі скла забезпечує додаткову можливість регулювати площу вихідного отвору шляхом зміни її ширини. Висота бункера становить 1 метр, що дає змогу досліджувати вплив висоти шару зернового матеріалу на процес його вивантаження. Для вимірювання маси зерна в одиниці об'єму застосовували електронні ваги SCARLETT з похибкою 1 грам.

Рисунок 3.3 – Ваги електронні SCARLETT

Для оцінки нерівномірності розподілу зернового матеріалу вздовж довжини випускного отвору було сконструйовано спеціальний приймальний пристрій у формі ящика (рис. 3.4).

Рисунок 3.4 – Приймальний пристрій

Приймальний контейнер являє собою прямокутну ємність, розділену на секції однакового об'єму. Уздовж висоти конструкції нанесено градуйовану шкалу, яка дає змогу визначати об'єм матеріалу. Одна з торцевих стінок виконана зі скла, що забезпечує можливість спостереження за процесом. Після повного спорожнення бункера через прозору поверхню можна наочно бачити, як зерновий матеріал розподілиться між секціями. У дослідженнях як сипучий матеріал використовувалася пшениця з рівнем вологості 13–16% (рис. 3.5).

Рисунок 3.5 – Фото матеріалу, що використовувався в досліджах (пшениця)

3.2 Методики проведення експериментальних досліджень та обробки експериментальних даних

У ході експериментальних досліджень модельний бункер із закритим випускним отвором заповнювали зерновим матеріалом, що має визначені фізико-механічні характеристики. Програма досліджень включала визначення таких параметрів зернової маси:

- середній (умовний) діаметр зерен;
- рівень вологості зернової культури;
- коефіцієнт зовнішнього тертя;
- коефіцієнт внутрішнього тертя;
- методику оцінювання рівномірності процесу звантаження сипучого матеріалу по довжині випускного отвору.

Методика визначення умовного діаметра зерен (d). Для цього відбирали по 500 зерен кожного виду досліджуваного матеріалу, після чого умовний діаметр розраховували за формулою (2.2).

Методика оцінювання рівномірності звантаження сипучого матеріалу.

Для визначення рівномірності розподілу зернової маси вздовж довжини випускного отвору використовували приймальний пристрій у формі скриньки. Додаткова вставка (рис. 3.6), яка з'єднувала бокові стінки бункера з приймальним пристроєм, забезпечувала точність вимірювання об'ємного

виходу зерна по всій довжині отвору. Після повного спорожнення бункера проводили фіксацію результатів вимірювань для кожної секції приймальної ємності.

Рисунок 3.6 – Тарування бункера при визначенні рівномірності вивантаження сипучого матеріалу: 1 – бічна стінка приймального пристрою; 2 – додаткова вставка; 3 – бічна стінка бункера; 4 – торцева стінка бункера.

Для оцінювання рівномірності розподілу сипучого матеріалу вздовж випускного отвору використовували спеціальний приймальний пристрій у вигляді скриньки. Додаткова вставка (рис. 3.6), яка з'єднувала бокові стінки бункера з приймальною ємністю, забезпечувала точність визначення об'ємного виходу зернової маси по всій довжині отвору. Після повного спорожнення бункера результати вимірювань для кожної секції заносилися до журналу спостережень. На основі цих даних розраховували показник нерівномірності вивантаження $R, \%$ для різних зернових культур, порівнюючи крайні секції з іншими за формулою (3.1).

$$R = \frac{\left[\frac{\sum_{i=2}^{w-1} V_i}{w-2} - \left[\frac{V_{k1} + V_{k2}}{2} \right] \right]}{\frac{\sum_{i=2}^{w-1} V_i}{w-2}} * 100\% , \quad (3.1)$$

де w - кількість секцій у приймальному пристрої, шт.;

V_{k1} і V_{k2} – об'єм крайніх секціях приймального ящика, м³, відповідно.

3.3 Підготовка проведення експериментальних досліджень

Розрахунок необхідної кількості повторності досвіду n обчислювалося за формулою [17]:

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{(\Delta_{отн} \cdot \bar{X})^2} , \quad (3.2)$$

де

$\Delta_{отн}$ – відносна похибка, що задається;

\bar{X} – середня арифметична величина часу закінчення сипучого матеріалу за результатами попереднього експерименту;

t – величина t -критерію Стюдента;

σ^2 – дисперсія генеральної сукупності величини часу закінчення.

По результатам попереднього експерименту для числа ступенів свободи $n-1=6$ і рівня значимості $\alpha=0,05$; $t = 2,447$

Дисперсія генеральної сукупності величини часу закінчення $\sigma^2=1,66$.

Відносна похибка, що задається $\Delta_{отн}=5\%$.

Довіра ймовірність 0,95. Середня арифметична величина часу закінчення пшениці за результатами пробного експерименту $X= 38,7с$.

Отже, число повторності досвіду приймаємо $n=3$.

Висновки до розділу

У ході роботи була використана експериментальна установка, обладнана необхідними вимірювальними приладами, що забезпечили проведення досліджень. Для порівняння отриманих експериментальних результатів із теоретичними залежностями застосовано експериментально-статистичний підхід, який базується на використанні методів математичної статистики та чисельного аналізу. Надійність і відтворюваність даних перевірялися за допомогою критерію Кохрена.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Вплив фізико-механічних властивостей кукурудзи на процес її витікання з бункера з випускним отвором

Процеси зберігання, транспортування, завантаження та розвантаження сипучих матеріалів безпосередньо визначаються їхніми фізико-механічними характеристиками. Саме ці властивості впливають на вибір конструктивних параметрів ємностей. На гравітаційне витікання зерна з бункера діє ціла низка факторів: рівень вологості, гранулометричний склад, коефіцієнти тертя, гігроскопічність та інші.

Насамперед слід окреслити властивості сипучих матеріалів, які мають найбільший вплив на процес спорожнення бункера:

Вологість - це співвідношення маси води, що випарувалася після висушування, до початкової маси матеріалу, виражене у відсотках. При кондиційній вологості (14–15,5%) вплив на сипкість вантажу є мінімальним.

Гранулометричний склад насипного вантажу - кількісний розподіл частинок за розмірами, що визначається ситовим аналізом. Під час спорожнення ємності важливим є співвідношення висоти випускного отвору до умовного діаметра зерен.

Насипна щільність - відношення маси сипучого матеріалу до об'єму, який він займає. У пневмосепаруючих машинах рівномірність насипної щільності по ширині пневмоканалу має вирішальне значення для якості очищення зерна.

Таким чином, фізико-механічні властивості сипучих матеріалів визначають ефективність роботи бункерних систем та якість технологічних процесів, пов'язаних із зерновими культурами.

Кут природного укосу - це кут, утворений горизонтальною площиною та лінією укосу насипного вантажу при вільній його відсипці. Якщо кут природного укосу має мінімальне значення (наприклад, зерно проса), то при випорожненні ємності рухливість його частинок максимальна.

Кут зовнішнього тертя - це мінімальний кут нахилу площини, у якому

починається вільно скочуватися сипкий вантаж. Відповідно, мінімальний кут нахилу днища в бункерному пристрої повинен бути більшим за кут зовнішнього тертя.

Гранична висота склепіння, що утворюється над випускним отвором, визначає мінімальну висоту самого отвору, за якої починається стабільне витікання сипучого матеріалу. Саме цей показник впливає на вибір конструктивних параметрів бункера. Висота склепіння використовується як критерій оцінки здатності різних сипких вантажів до безперервного вивантаження.

Основні фізико-механічні властивості зернових матеріалів представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Основні фізико-механічні властивості дослідного матеріалу

Найменування показника	Пшениця
Гасипна густина, кг/м ³	610... 825
Кут природного уклосу, град:	
-в спокої	35-40
-в русі	26-29
Коефіцієнт зовнішнього тертя:	
по сталі	0,37..0,60
по дереву	0,33..0,62
по гумі	0,47..0,66
Коефіцієнт внутрішнього тертя	0,51
Швидкість витання, м/с	9,0... 10,5
Коефіцієнт тертя спокою	0,4...0,6
Кут природного уклосу, град.	35...39
Умовний діаметр зерна, мм	3.1...4.2

Для проведення експериментів було взято зерно - пшеницю, фізико-механічні властивості якої представлені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів

Зерновий матеріал	Середній діаметр зерен мм, мм	Кут зовнішнього тертя, град.ф, ϕ	Кут внутрішнього тертя, град ψ	Кут укладання, град β	Вологість зернового матеріалу, %	Густина ρ , кг/м ³
Пшениця	3,7	23,1	17,2	31	14,4	811

Вологість зернових матеріалів визначали за ДСТУ 3768:2019 «Пшениця. Технічні умови». У всіх експериментах вологість повітря була 60%, максимальний обсяг засипки зернових матеріалів – 0,03 м³.

З аналізу табличних даних випливає, що умовний діаметр частинок зерен знаходиться в межах 2-8 мм, тому при дослідженні процесу закінчення зернових матеріалів необхідно враховувати дисперсійні властивості.

4.2 Вплив кута нахилу днища бункера з випускним отвором на процес витікання пшениці.

Як зазначалося раніше, у сільськогосподарських бункерах розрізняють три основні типи витікання сипучих матеріалів: нормальний, гідравлічний та змішаний. Найчастіше спостерігається саме змішаний варіант, який характеризується переходом від гідравлічного до нормального режиму. Характер процесу витікання визначається передусім фізико-механічними властивостями зернової маси та конструктивними параметрами бункера — зокрема кутом нахилу днища, висотою випускного отвору та геометричними розмірами ємності.

Особливу увагу варто приділити впливу кута нахилу днища на перебіг процесу витікання сипучого матеріалу. Візуальні спостереження показали, що зерна пшениці та соняшнику, які мають еліпсоїдну форму, орієнтуються

своєю більшою віссю паралельно до днища та спрямовуються у бік випускного отвору [16].

Досліджували зерновий матеріал, фізико-механічні властивості якого представлені у таблиці 4.2. Кути нахилу днища бункера до вертикалі приймали значення: 25, 30, 37, 45, 53, 60°. Відносна вологість повітря становила 63%, температура повітря 21-25 ° С. У таблиці 4.3 представлені дані проведених досліджень.

Таблиця 4.3 - Вплив кута нахилу днища бункера на час витікання сипучих матеріалів при об'ємі зернового матеріалу 0,03м³ та площі випускного отвору 0,017 м²

Матеріал	№ дос- ліду	Час витікання					
		При $\theta = 25^\circ$	При $\theta = 30^\circ$	При $\theta = 38^\circ$	При $\theta = 45^\circ$	При $\theta = 56^\circ$	При $\theta = 60^\circ$
Пшениця	1	11,77	10,74	10,52	10,44	11,13	12,15
	2	11,84	10,81	10,59	10,51	11,2	12,57
	3	11,4	10,37	10,15	10,37	10,76	12,13
ср. знач.		11,67	10,64	12,55	12,45	13,45	16,04
Дисп.		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Дов. інтервал		0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72

З таблиці слідує, що час спорожнення сипучого матеріалу зменшується зі збільшенням кута нахилу днища, досягаючи свого мінімального значення при куті нахилу днища $\theta = 45^\circ$. При подальшому збільшенні θ час закінчення знову збільшується. Це говорить про те, що перехід гідравлічного виду закінчення до нормального супроводжується зменшенням зовнішнього кута тертя (φ) щодо наведеного кута тертя матеріалу ($\varphi_{пр}$). Такий перехід сприяє появі динамічних склепін, що перешкоджають спорожненню сипучого матеріалу. Також зі збільшенням кута нахилу днища сила тертя зменшується, що сприяє зменшенню ймовірності утворення застійної зони в зоні лару днища і задньої стінки бункера. Це веде до того, що збільшення θ

зменшує ймовірність переходу гідравлічного виду витікання нормальний.

При різних кутах цей перехід починається у час. Цьому переходу завжди супроводжує утворення застійної зони сипучого матеріалу в зоні сполучення задньої стінки бункера та його днища. Кожному куту нахилу днища відповідає свій час цього переходу, який можна побачити з наведених далі графіків.

Залежно від витрати сипучого матеріалу можна будувати висновки про характер та вид витікання (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 - Вплив кута нахилу днища бункера на витрату зернового матеріалу

Сипучий матеріал	№ дослід. у	Об'єм зернового матеріалу 0,03 м ³					
		Площа випускного отвору S=0,015 м ²					
		Витрата сипучого матеріалу, м ³ /с*10 ⁻³					
		При $\theta = 25^\circ$	При $\theta = 30^\circ$	При $\theta = 38^\circ$	При $\theta = 45^\circ$	При $\theta = 56^\circ$	При $\theta = 60^\circ$
Пшениця	1	2,67	2,92	2,98	3	2,82	2,52
	2	2,74	2,99	3,05	3,07	2,89	2,59
	3	2,3	2,55	2,61	2,63	2,45	2,15
ср. знач.		2,57	2,57	2,82	2,88	2,9	2,72
Дисп.		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Дов. інтервал		0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58

У процесі закінчення зернового матеріалу з бункера з отвором завжди спостерігається перехід з гідравлічного виду витікання до нормального всіх досліджуваних зернових матеріалів.

На основі отриманих експериментальних даних побудовано графіки залежностей (рисунки 4.3-4.7)

Рисунок 4.3 – Залежність витрати пшениці від часу витікання при $V=0,03$ м³, $S_2=0,015$ м² та різних значеннях кута нахилу днища θ

З графіка (див. рисунок 4.3) видно, що при куті нахилу днища $\theta = 45^\circ$ витрата пшениці має максимальне значення. Зі зменшенням чи збільшенням кута нахилу днища він зменшується. Це зумовлено тим, що зі збільшенням кута нахилу днища інерційні сили, що набувають зерна в зоні випускного отвору, перевищують сили тертя, отже, витрата збільшується, досягаючи максимального значення при $\theta = 45^\circ$. Далі із збільшенням перетин потоку зменшується, а ймовірність утворення склепінь збільшується. Це призводить до збільшення енергії, що витрачається на руйнування склепінь, і, як наслідок, відбувається зменшення масового вивантаження зернового матеріалу. Рекомендований діапазон кута нахилу днища знаходиться в межах 30-50°

Найбільш ця тенденція помітна таких зернових культур, як соняшник і

кукурудза, розміри зерен яких значно перевищують розміри інших культур. Інакше висловлюючись, при зменшенні збільшується ймовірність утворення склепінь, і процес закінчення починає погіршуватися.

З графіків також видно, що швидкість закінчення має прямо пропорційну залежність від висоти випускного отвору. Це з тим, що з малих h вплив склепінь на процес витікання значний, навіть невелике збільшення висоти випускного отвору веде до різкого збільшення швидкості. За умови $d = 15$ вплив зводів на швидкість закінчення зменшується, і подальше збільшення висоти випускного отвору не призводить до значного зростання швидкості.

Зі збільшенням кута нахилу днища сила тертя зернового матеріалу об днище бункера зменшується, при цьому швидкість витікання зростає, досягаючи свого максимального значення при куті нахилу днища $\theta = 45^\circ$. Проте зі збільшенням θ зменшується мінімальний переріз бункера, при цьому зростає ймовірність свободи утворення, що гальмує процес витікання. Тому подальше збільшення кута нахилу сприяє лише погіршенню процесу витікання (рисунок 4.4).

Рисунок 4.4 – Залежність швидкості закінчення зернових культур від кута нахилу днища при $V = 0,03 \text{ м}^3$, $S_2 = 0,015 \text{ м}^2$

З графіка видно, що при збільшенні кута нахилу днища питома робота, що здійснюється на подолання сил зовнішнього тертя при переміщенні зернового матеріалу вздовж задньої та торцевої стінок бункера, зменшується. Це зумовлено тим, що при збільшенні нормальний тиск на стінки бункера залишається постійною величиною, а площа цих стінок зменшується. У зв'язку з тим, що обсяг зернового матеріалу був фіксований, площа взаємодії зернового матеріалу з передньою стінкою бункера зі збільшенням кута нахилу днища збільшувалася, отже, зростала і питома робота, що здійснюється на подолання сил тертя.

Висновки до розділу

Об'ємна витрата зернової маси визначається способом регулювання площі випускного отвору. Якщо зміна площі здійснюється за рахунок висоти отвору, то середній показник витрати зерна виявляється приблизно на 16% більшим порівняно з випадком, коли регулювання проводиться шляхом зміни довжини отвору.

5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

5.1 Екологічна експертиза

Охорона довкілля та раціональне використання природних ресурсів є одним із ключових напрямів розвитку аграрної сфери. В умовах стрімкого науково-технічного прогресу та державного будівництва вплив людської діяльності на природу стає надзвичайно значним. Розвиток промислових галузей призводить до трансформації ландшафтів, забруднення ґрунтів, водним та атмосфери, скорочення площ лісових масивів, зменшення чисельності диких тварин і рибних ресурсів [21].

Останнім часом у багатьох розвинених країнах світу екологічна політика набуває особливого значення. Подібні процеси спостерігаються і в Україні, де протягом останніх років формується система екологічного законодавства. За цей період ухвалено основні нормативно-правові акти, що регулюють ключові аспекти охорони навколишнього середовища та використання природних багатств.

До головних чинників, які спричинили екологічну кризу в Україні, належать:

- спрощення великої кількості потужних хімічних, металургійних, нафтопереробних і зійскових підприємств без належних захисних систем;
- вигідне географічне положення країни, її значні природні ресурси, чисельна робоча сила та розгалужена транспортна мережа;
- будівництво масштабних тваринницьких комплексів без відповідних очисних споруд;
- проведення меліоративних робіт без застосування науково обґрунтованих і ефективних технологій;
- відсутність екологічної експертизи проектів у промисловості, енергетиці та транспорті;
- використання застарілих технологій та обладнання, що давно потребують модернізації;

- нестача систематичного моніторингу та об'єктивної інформації для населення щодо стану довкілля, а також механізмів виживлення порушників і компенсації збитків [25];
- низький рівень екологічної освіти управлінців, підприємців та інженерів, слабка екологічна культура й свідомість;
- відсутність дієвих економічних стимулів для впровадження природоохоронних заходів;
- недостатній державний контроль за виконанням законодавства у сфері охорони природи та відсутність належної відповідальності за шкоду, завдану довкіллю й людині.

З метою охорони та покращення стану довкілля, а також регулювання суспільних відносин у сфері раціонального використання природних ресурсів, Верховна Рада України ухвалила Закон «Про екологічну експертизу». Цей нормативний акт визначає форми власності на природні багатства, встановлює правила їх використання, забезпечує економічне та ефективне природокористування, передбачає проведення екологічної експертизи при передачі ресурсів у користування, регламентує контроль за їх застосуванням та визначає види відповідальності за порушення вимог природоохоронного законодавства. На основі цього закону були розроблені Земельний, Водний, Лісовий кодекси, Кодекс «Про надра», а також закони України «Про природно-заповідний фонд України», «Про охорону атмосферного повітря», «Про тваринний світ», «Про екологічну експертизу» та інші [24].

Розглянемо основні заходи захисту довкілля під час роботи обладнання кормоприготувального цеху КОРК-15А. У процесі подрібнення зерна та виготовлення сінного борошна за допомогою кормодробарки КДУ-2У у повітря потрапляє значна кількість пилу, борошна та дрібних частинок. Для зменшення їх викиду в атмосферу у витяжних вентиляційних системах встановлюють пилозловачі та сітчасті фільтри.

При експлуатації парового котла Д-250, що працює на рідкому паливі, утворюється велика кількість вуглекислого газу та сажі. Тому доцільно застосовувати рідке пальне, яке не лише зменшує шкідливі викиди, але й є економічно вигіднішим.

5.2 Охорона праці

Згідно з положеннями Закону України «Про охорону праці» [25], охорона праці розглядається як сукупність правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та медико-профілактичних заходів, спрямованих на підтримку здоров'я та працездатності працівників у процесі їхньої професійної діяльності. Контроль за створенням безпечних умов праці здійснюється уповноваженими державними органами.

Законодавство у сфері охорони праці визначає ключові принципи реалізації конституційного права громадян на охорону життя та здоров'я під час виконання трудових функцій. Воно гарантує належні умови праці та регулює взаємовідносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки, виробничої гігієни та організації виробничого середовища. Крім того, закон встановлює єдиний механізм функціонування системи охорони праці в Україні за участю органів державної влади.

Основою нормативного регулювання у сфері охорони праці є Конституція України, Закон «Про охорону праці», Кодекс законів про працю, постанови Верховної Ради, декрети та розпорядження Кабінету Міністрів, а також розпорядження органів, що здійснюють державне управління у цій сфері. Крім того, застосовуються інші нормативні акти, що деталізують та регулюють питання безпеки праці.

Розрахунок контурного заземлення. Розрахунок параметрів заземлення виконано відповідно до вимог «ДСТУ 7237:2011 – Система норм безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту».

Для розрахунку контурного заземлення приймаємо наступні дані:

- довжина заземляючого стержня $l=2$ м;
- діаметр вертикальних заземлителів $d_v=0,05$ м;
- ширина смуги горизонтального заземлителя $h_g=0,06$ м;
- глибина заставляння вертикального заземлителя $h_v=0,7$ м.

Розрахунок розпочинаємо з визначення питомого опору ґрунту. Для суглинку $\rho=100$ Ом/м³.

Згідно ДСТУ 7237:2011 вибираємо допустимий опір заземляючого обладнання R_d .

Визначаємо відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлителя за формулою [28]:

$$t = h_v + \frac{l}{2}, \quad (5.1)$$

$$t = 0,7 + \frac{2}{2} = 1,7 \text{ м.}$$

Визначаємо опір протіканню струму для подинного поглибленого вертикального заземлителя

$$R_{в.з.} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d_v} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4t+l}{4t-l} \right) \right), \quad (5.2)$$

$$R_{в.з.} = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \left(\ln \frac{2 \cdot 2}{0,05} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4 \cdot 1,7 + 2}{4 \cdot 1,7 - 2} \right) \right) = 36,7 \text{ Ом.}$$

Визначаємо число вертикальних заземлителів без урахування коефіцієнта екранування

$$n = \frac{R_d}{R_{в.з.}}, \quad (5.3)$$

$$n = \frac{36,7}{5} = 7,34 \text{ шт.}$$

Приймаємо $n=8$.

Визначимо необхідну кількість вертикальних заземлителів з урахуванням

коефіцієнта екранування:

$$n_{\text{в}} = \frac{R_{\text{в.з.}}}{n \cdot Q_{\text{в}}}, \quad (5.4)$$

де $Q_{\text{в}}$ - коефіцієнт екранування; для вертикальних заземлительів $Q_{\text{в}}=0,61$;

$$n_{\text{в}} = \frac{36,7}{8 \cdot 0,61} = 7,5 \quad \text{шт.}$$

Приймаємо $n_{\text{в}}=8$.

Визначимо розрахунковий опір для усіх вертикальних заземлительів з урахуванням коефіцієнта екранування

$$R_{\text{в}} = \frac{R_{\text{в.з.}}}{n_{\text{в}} \cdot Q_{\text{в}}}, \quad (5.5)$$

$$R_{\text{в}} = \frac{36,7}{8 \cdot 0,61} = 7,52 \quad \text{Ом.}$$

Визначимо довжину горизонтальних з'єднань при контурному заземленні $l = P_{\text{буд}} = 132$ м, де $P_{\text{буд}}$ - периметр будівлі, м.

Визначимо опір розтіканню струму в горизонтальному заземлителі з урахуванням коефіцієнта екранування за формулою:

$$R_{\Gamma} = \frac{R_{\text{в}}}{2 \cdot \pi \cdot \rho_{\text{г}} \cdot Q_{\text{г}}} \cdot \ln \frac{2 \cdot \rho_{\text{г}}}{h_{\text{г}} \cdot h_{\text{в}}}, \quad (5.6)$$

де $Q_{\text{г}}$ - коефіцієнт екранування; для горизонтальних заземлительів, $Q_{\text{г}}=0,4$.

$$R_{\Gamma} = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 132 \cdot 0,4} \cdot \ln \frac{2 \cdot 132^2}{0,06 \cdot 0,7} = 7,2 \quad \text{Ом}$$

Визначаємо загальний розрахунковий опір розтіканню струму в заземленому контурі

$$R_{\text{н}} = \frac{R_{\text{в}} \cdot R_{\Gamma}}{R_{\text{в}} + R_{\Gamma}} \quad (5.7)$$

$$R_n = \frac{7,52 \cdot 7,2}{7,52 + 7,2} = 3,7 \text{ Ом.}$$

Умова $R_n < R_d$ виконана, оскільки $3,7 < 4 \text{ Ом}$.

5.3 Техніко-економічне обґрунтування досліджень

При оцінюванні економічної ефективності результатів дослідження за базовий варіант було прийнято кормовий бункер типу УСК. Це вертикальна конструкція двошнекового типу з місткістю $2,0 \text{ м}^3$. Бункер складається з двох камер змішування: внутрішньої циліндричної та зовнішньої циліндрично-конічної. У верхній частині зовнішньої камери розташований привід вертикальних шнеків, а в нижній конічній частині знаходиться завантажувальне вікно, обладнане електромеханічною засувкою. У середині циліндричної камери встановлено два вертикальні шнеки, що працюють з різними швидкостями. Така конструкція створює диференціальний ефект між потоками кормів, забезпечуючи їх змішування у двох напрямках одночасно, що значно прискорює процес.

Запропонований нами варіант бункера також має дві камери змішування — внутрішню циліндричну та зовнішню циліндрично-конічну. Основна відмінність полягає у тому, що всередині встановлено лише один вертикальний шнек. На внутрішній поверхні кожуха, який охоплює шнек, закріплена дзозахідна реборда, розташована під певним кутом до спіралі. Крім того, на верхньому торці кожуха встановлено конічний розсіювач зі змінним радіусом. Завдяки цим конструктивним удосконаленням, як показали результати досліджень, забезпечується якісне змішування кормів у необхідний проміжок часу.

Використання одного вертикального шнека у запропонованій конструкції дозволяє суттєво знизити потребу в потужності електродвигуна, а також зменшити габарити та масу бункера порівняно з базовим варіантом. При цьому продуктивність залишається вищою, ніж у стандартного бункера УСК.

Запропонований варіант потребує меншої потужності приводу, має нижчу собівартість та відповідно менші амортизаційні відрахування.

Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку техніко-економічної оцінки

№	Показники	Базовий варіант	Запропонований варіант
1	Продуктивність при періодичному змішуванні, т/год	4,0	4,1
2	Об'єм бункера, м ³	2,0	2,0
3	Однорідність змішування, %	93	93
4	Тривалість змішування, хв	4	4
5	Потужність електрприводу, кВт	8,1	4,1
6	Кількість робочих днів у році	250	244
7	Кількість змін на добу	1	1
8	Тривалість зміни при п'ятиденному робочому тижні, годин	8	8
9	Коефіцієнт використання часу-зміни	0,8	0,8
10	Ціна бункера, тис. грн.	293	235
11	Маса, кг	1200	900

Ефективність запропонованого бункера можна оцінити за допомогою чистого приведеного (дисконтованого) доходу (ЧДД), який являє різницю між доходами П, отриманими за термін експлуатації бункера і інвестиціями, які визначаються ціною запропонованого бункера C_{np} :

$$ЧДД = \sum_{t=1}^T \frac{П}{(1+r)^t} - C_{np}, \quad (5.8)$$

де Т – горизонт розрахунку;

г – рівень інфляції;

t - крок розрахунку.

За крок розрахунку прийнятий один календарний рік, за горизонт розрахунку - п'ять років, індекс інфляції в 2019 році не перевищує 5,5%.

Результати, одержані на кроці розрахунку при впровадженні запропонованого варіанту бункера кормів, можна визначити за формулою:

$$П = E_{ек.ел} + E_{ам.від} + Д_{дох}, \quad (5.9)$$

де $E_{ек.ел}$ - економія коштів на електроенергії;

$E_{ам.від}$ - економія коштів по амортизаційних відрахуваннях;

$Д_{дох}$ - дохід від реалізації додаткової продукції, яка утворюється за рахунок більш високої продуктивності запропонованого бункера.

Витрата коштів на електроенергію:

$$P_{ел} = N_{р.дн} \cdot n_{зм} \cdot t_{зм} \cdot k_{е.зм} \cdot N_{дв} \cdot Ц_{ел}, \quad (5.10)$$

де $N_{р.дн}$ - число робочих днів у році;

$n_{зм}$ - число змін;

$t_{зм}$ - тривалість зміни;

$k_{е.зм}$ - коефіцієнт використання часу зміни;

$N_{дв}$ - встановлена потужність електродвигуна;

$Ц_{ел}$ - ціна 1 кВт·год електроенергії.

Витрата коштів за електроенергію за перший рік експлуатації:

за базовим варіантом:

$$P_{ел.б} = 250 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 0,8 \cdot 4,1 \cdot 5,2 = 67,39 \text{ тис. грн}$$

за запропонованому варіанту:

$$P_{ел.пр} = 250 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 0,8 \cdot 4,1 \cdot 5,2 = 34,11 \text{ тис. грн}$$

Економія коштів за електроенергію за перший рік експлуатації:

$$E_{ек.ел} = 67,39 - 34,11 = 33,28 \text{ тис. грн.}$$

З урахуванням щорічного зростання тарифів на електроенергію в розмірі 6% отримаємо:

за другий рік експлуатації

$$P_{ел.б2} = 67,39 \cdot 1,06 = 71,99 \text{ тис. грн}$$

$$P_{ел.пр2} = 34,11 \cdot 1,06 = 36,16 \text{ тис. грн.}$$

$$E_{ек.ел2} = 71,99 - 36,16 = 35,84 \text{ тис. грн}$$

за третій рік експлуатації

$$P_{ел.б3} = 71,99 \cdot 1,06 = 76,32 \text{ тис. грн}$$

$$P_{ел.пр3} = 36,16 \cdot 1,06 = 38,33 \text{ тис. грн.}$$

$$E_{ек.ел3} = 76,32 - 38,33 = 37,99 \text{ тис. грн}$$

Економія коштів на амортизаційні відрахування за один рік експлуатації запропонованого бункера складе:

$$E_{ам.від} = \frac{C_B - C_{пр}}{N_{р.е}}, \quad (5.11)$$

де C_B - ціна базового бункера;

$C_{пр}$ - ціна запропонованого бункера;

$N_{р.е}$ - число років експлуатації запропонованого бункера (горизонт розрахунку).

$$E_{ам.від} = \frac{293 - 235}{3} = 19,3 \text{ тис. грн}$$

Дохід від реалізації додаткової продукції:

$$D_{дод} = N_{р.дн} \cdot n_{зм} \cdot k_{в.зм} \cdot \Delta Q \cdot C_k, \quad (5.12)$$

де ΔQ - різниця між продуктивністю пропонованого бункера і продуктивністю базового варіанту;

C_k - оптова ціна 1 тони комбікорму.

$$D_{\text{од}} = 250 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 0,8 \cdot 0,1 \cdot 4,8 = 768 \text{ тис. грн}$$

Тоді прибуток П (досягається результат) складе:

за перший рік експлуатації

$$P_1 = 33,28 + 11,6 + 768 = 812,88 \text{ тис. грн}$$

за другий рік експлуатації

$$P_2 = 35,84 + 11,6 + 768 = 815,44 \text{ тис. грн}$$

за третій рік експлуатації

$$P_3 = 37,99 + 11,6 + 768 = 817,59 \text{ тис. грн}$$

Визначимо щорічний дохід з урахуванням рівня інфляції за виразом:

$$P_t = \frac{P}{(1+r)^t} \quad (5.13)$$

Ці доходи складуть:

за перший рік експлуатації становить:

$$P_{i1} = 812,98 / 1,055 = 765,52 \text{ тис. грн}$$

за другий рік експлуатації становить:

$$P_{i2} = 815,44 / 1,11 = 721,63 \text{ тис. грн}$$

за третій рік експлуатації становить:

$$P_{i3} = 817,59 / 1,165 = 681,32 \text{ тис. грн}$$

Визначимо частий дисконтний дохід за час експлуатації запропонованого бункера протягом трьох років становить:

$$ЧЧД = 765,52 + 721,63 + 681,32 - 235 = 1934 \text{ тис. грн}$$

З аналізу видно, що використання запропонованого бункера кормів економічно доцільно, а капітальні витрати окупаються приблизно, за один рік.

ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень можна сформулювати такі результати:

Встановлено, що зі збільшенням висоти випускного отвору вплив склепінь на процес витікання сипучого матеріалу зменшується за експоненційною залежністю. При цьому максимальна швидкість витікання досягається за певного кута нахилу днища.

Об'ємна витрата зернової маси визначається способом регулювання площі випускного отвору. Якщо площа змінюється за рахунок висоти, то середній показник витрати зерна приблизно на 16% перевищує значення, отримане при регулюванні довжинного отвору.

Аналіз регресійної моделі показав, що основними чинниками, які впливають на рівномірність розподілу зернового матеріалу вздовж випускного отвору, є висота та кут нахилу днища. Оптимальним значенням кута нахилу, за якого нерівномірність вивантаження мінімальна, є 45° . Водночас збільшення висоти отвору призводить до зростання нерівномірності витікання.

За результатами перевірки за F-критерієм Фішера підтверджено адекватність запропонованої теоретичної моделі, яка описує залежність швидкості витікання зернового матеріалу від його фізико-механічних характеристик та конструктивних параметрів бункера.

Список джерел посилання

1. Мухопад М. Д. Транспортні машини. Харків : Сснова, 1993. 192 с.
2. Мала гірнича енциклопедія : Донецьк : Східний видавничий дім, 2004–2013.
3. Bischoff W., Bramann H. Bochum: Das kleine Bergbaulexikon Essen : VGE-Verlag, 2012. 393 p.
4. Стаценко В. В., Біла Т. Я., Бурмістенков О. П. Аналіз руху сипкого матеріалу на виході бункерів. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2018. № 4. С. 85–95.
5. В.І. Гноєвий, В.О. Голозко, О.К. Тріщид, І.В. Годівля високопродуктивних корів . Харків : Прапор, 2009. – 368 с.
6. Костенко В. І., Заболотько О. О., Хмельовський В. С. Ефективність використанні комбінованих транспортно-технологічних засобів для годівлі ВРХ. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2015. Вип. 212/2. С. 115–122.
7. Окопний О.М. Відродження тваринництва в Україні та напрями його розвитку Економіка АПК. 2003. № 5 С.8-14.
8. Кравчук В. І., Луценко М. М., Мечта В. П. Прогресивні технології заготівлі, приготування і роздавання кормів : науково-практичний посібник. Київ : Фенікс, 2008. 104 с.
9. Ревенко І. І. Механізація та автоматизація у тваринництві і птахівництві. Київ : Урожай, 1995. 635 с.
10. Дерев'янко Д. А. Вплив технічних засобів та технологічних процесів на травмування і якість насіння: монографія. Житомир : Полісся, 2015. 772 с.
11. Ревенко І.І., Брагінець М.В. Машини та обладнання для тваринництва : підручник. Київ : Конкор, 2009. 731 с.
12. Носов М.С. Механізація робіт на тваринницьких фермах : навч. посібник.

Київ : Вища школа, 1994. 367с.

13. Сушков П. Ф. Кормодробарка: теорія, конструкція та виробництво с.-г. машин. Київ, 1986. 256 с.

14. Єгоров Б.В. Технологія виробництва комбікормів. Одеса : Друкарський дім, 2011. 448 с.

15. Мельников С.В. Планування експерименту у дослідах сільськогосподарських. Київ : Колос, 1980. 168 с.

16. Омельченко О.О., Ткач В.Д. Довідник з механізації тваринницьких і птахівничих ферм та комплексів. Київ : Урожай, 1982. 270 с.

17. Ревенко І.І. Посібник-практикум з механізації виробництва продукції тваринництва. Київ : Урожай, 1994. 228с.

18. Бойко І.Г., Грідасов В.І. Практикум по машинах і обладнанні для тваринництва Харків : НМЦ ХНТУСГ, 2004. 275 с.

19. Сиротюк В.М. Машини та обладнання для тваринництва : навчальний посібник. Львів : «Магнолія плюс», 2004. 200 с.

20. Грідасов В.І., Дзюба А.І. Тестів та розрахунок машин для тваринництва. Харків : НМЦ ХНТУСГ, 2002. 216с.

21. Троянов М.М. Механізація технологічних процесів у тваринництві. Харків : Прапор, 1993. 140 с.

22. Шабельник Б.П., Троянов М.М. Теорія та розрахунок машин для тваринництва. Харків : Прапор, 2002. 216 с.

23. Закон України « Про економічну експертизу» відомості Верховної Ради України (ЗВР), 1995, №8, ст. 54.

24. Головка В.О. Сільськогосподарська екологія: навчальний посібник для студентів вузів. Харків: Ескада, 2009. 617 с.

25. Охорона праці в галузі – Збірник схем, термінів, довідкових даних, розрахунків та тестів. Полтава: ПДАА, 2005. 118 с.

26. Оларченко М.С., Степанос В.І. Основи охорони праці : підручник. Харків :

2017. Кулішов В. В. Економіка підприємства: теорія і практика: навч. посіб. К. :

Ніка-Центр, 2002. 216 с.

27. В.В. Березуцький, Н.Л. Березуцька, А.О. Богодист. Безпека людини у сучасних умовах: Монографія.; Харків: ФОП Мезіна В.В., 2018. 208 с.

28. ДСТУ 4397:2005 «Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування».