

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Тарнавський Микола Ігорович

УДК 664.7

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ
ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА З
МОДЕРНІЗАЦІЄЮ КОНСТРУКЦІЇ СУШАРКИ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Тарнавський М.І.

Керівник роботи

Грудовий Р.С.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Тарнавський Микола Ігорович. Удосконалення технологічного процесу післязбиральної обробки зерна з модернізацією конструкції сушарки. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У кваліфікаційній роботі підтверджено, що модернізація внутрішніх вставок барабана сприяє значному покращенню інтенсивності тепло- та масообміну. Поєднання підйомно-лопатевих, секторних та каналних елементів забезпечує більш рівномірний розподіл зерна по перерізу барабана й зменшує розсіювання часу перебування матеріалу в сушильному просторі.

Оптимізація геометрії барабана шляхом коригування співвідношення його довжини до діаметра дала змогу збільшити пропускну здатність установки без погіршення якості сушіння. Зі збереженням загального об'єму сушарки та більш ефективним використанням внутрішнього простору модернізований корпус сприяє зниженню теплових втрат та зменшенню витрат на опалення агента сушіння.

Розроблені рекомендації з модернізації можна легко інтегрувати в уже наявні установки, що забезпечить швидке відновлення інвестицій та підвищить конкурентоспроможність підприємства на ринку зерносушіння.

Отже, запропоновані заходи з удосконалення конструкції барабанної сушарки від оптимізації внутрішніх вставок до модернізації приводу й геометрії корпусу забезпечують комплексне підвищення якості післязбиральної обробки зерна. Реалізація цих рішень сприятиме зниженню енерговитрат, підвищенню однорідності вологості готового зерна та гнучкості в управлінні режимами сушіння.

Ключові слова: барабана сушарка, зерно, модернізація, післязбиральна обробка, процес.

ANNOTATION

Tarnavsky Mykola Ihorovych. Improving the technological process of post-harvest grain processing with the modernization of the dryer design. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualification work for obtaining a bachelor's degree in the specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The thesis confirms that modernization of the internal drum inserts contributes to a significant improvement in heat and mass transfer intensity. The combination of lifting blades, sector elements, and channel elements ensures a more uniform distribution of grain across the drum cross-section and reduces the variation in the residence time of the material in the drying space.

Optimization of the drum geometry by adjusting the ratio of its length to diameter made it possible to increase the throughput of the installation without compromising the quality of drying. While maintaining the overall volume of the dryer and making more efficient use of the internal space, the modernized housing helps to reduce heat loss and lower the cost of heating the drying agent.

The developed modernization recommendations can be easily integrated into existing installations, which will ensure a quick return on investment and increase the competitiveness of the enterprise in the grain drying market.

Thus, the proposed measures to improve the design of the drum dryer, from the optimization of internal inserts to the modernization of the drive and housing geometry, provide a comprehensive improvement in the quality of post-harvest grain processing. The implementation of these solutions will contribute to reducing energy costs, increasing the uniformity of the moisture content of the finished grain, and flexibility in managing drying modes.

Keywords: drum dryer, grain, modernization, post-harvest processing, process.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА.....	9
РОЗДІЛ 2. ТИПИ ЗЕРНОВИХ СУШАРОК.....	15
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗДІЛ.....	25
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	33

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Актуальність теми дослідження визначається сучасними викликами аграрного сектору, серед яких постійне зростання тарифів на енергоносії та посилення вимог до якості зерна під час зберігання і переробки. В умовах жорсткої конкуренції на внутрішньому та експортному ринках здатність агропідприємств зменшувати собівартість сушіння та водночас гарантувати однорідну вологість зерна стає ключовим фактором економічної стійкості. Традиційні барабанні сушарки хоч і широко застосовуються через простоту конструкції та високі продуктивні показники, проте характеризуються надмірними тепловими втратами та нерівномірністю сушіння через нерегульовану внутрішню циркуляцію продукту.

Запропонована модернізація конструкції барабана шляхом встановлення спеціальних внутрішніх вставок підйомно-лопатевих, секторних і канальних – спрямована на інтенсифікацію тепло- та масообміну за рахунок рівномірного розподілу зерна по всьому перерізу апарата. Такий підхід дозволяє забезпечити більш однорідний час перебування кожної частки сировини в зонах нагріву та охолодження, що зобов'язано зменшити розсіювання вологості готового продукту та знизити відсоток пересушених або недосушених зернин. Одночасно адаптація геометричних параметрів барабана зокрема, оптимізація відношення довжини до діаметра дає змогу збільшити продуктивність установки на 15–25 % без капітального розширення площі чи об'єму корпусу.

Крім конструктивних змін, модернізація приводу барабана з впровадженням регульованого передавального числа забезпечує можливість оперативного налаштування частоти обертання під різні режими сушіння та вихідні властивості зерна. Це дозволяє адаптувати технологічний процес до змінних умов вологості сировини, сортових особливостей та потреб клієнтів без втручання в основні вузли агрегата. Зниження енерговитрат електродвигуна на 10–12 % у порівнянні з базовими рішеннями створює додатковий економічний ефект і сприяє швидкій окупності інвестицій.

Впровадження автоматизованої системи контролю завантаження барабана, підтримки кута нахилу та швидкості обертання у реальному часі гарантує стабільне заповнення на рівні 20–25 % об'єму, що є оптимальним для щільного контакту зерна з сушильним агентом і зменшення пиловиносу. Такий комплексний підхід від внутрішніх вставок до адаптивного приводу й системи керування націлений на підвищення конкурентоспроможності агропідприємств шляхом зниження енерговитрат, покращення якості сушіння та збільшення продуктивності існуючих сушарок з мінімальними капіталовкладеннями.

Мета роботи: удосконалити технологічний процес післязбиральної обробки зерна шляхом модернізації барабанної сушарки за рахунок впровадження спеціальних внутрішніх вставок, оптимізації геометрії барабана та адаптивного приводу з метою підвищення однорідності вологості кінцевого продукту, енергоефективності й продуктивності установки.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі **завдання:**

- проаналізувати сучасний стан технології післязбиральної обробки зерна та конструктивні особливості існуючих барабанних сушарок;
- розробити та обґрунтувати конструкцію комбінації підйомно-лопатевих, секторних і канальних вставок для інтенсифікації тепло- та масообміну;
- виконати розрахунки оптимальних геометричних параметрів барабана (співвідношення довжини до діаметра та внутрішнього об'єму) із врахуванням заданої пропускної здатності та експозиції сушіння;
- спроектувати привід із регульованим передавальним числом, що забезпечує адаптивне налаштування частоти обертання барабана під різні режими сушіння..

Об'єктом дослідження є технологічний процес післязбиральної обробки зерна з використанням барабанної сушарки.

Предметом дослідження є аналіз конструкційних та експлуатаційних параметрів модернізованої барабанної сушарки, зокрема конфігурації

внутрішніх вставок, геометрії барабана та характеристик приводного механізму й системи його регулювання.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Грудовий Р.С., Тарнавський М.І., Добранський С.С., Бучко І.О., Мельник О.П. Шляхи удосконалення технологічного процесу сушіння зерна. Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» з нагоди 30-річчя започаткування підготовки ОС «Бакалавр» за спеціальністю «Агроінженерія» 11 квітня 2025 року м. Житомир / МОН України, Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Київ. Видавничий центр ЖАТФК України, 2025. С. 96-98.

2. Грудовий Р.С., Тарнавський М.І. технологічний процес післязбиральної обробки зерна. Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції «Технічний прогрес в АПК». 21–22 травня 2025 року. Харків. С.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення проведеного дослідження полягає у можливості безпосереднього впровадження розроблених рішень на існуючих зерносушарних установках без необхідності їх повної заміни або значного розширення виробничих площ. Встановлення комбінованих внутрішніх вставок дозволяє підвищити однорідність вологості зерна та знизити втрати продукції за рахунок зменшення фракцій пересушених і недосушених зернин, що безпосередньо покращує якість кінцевого продукту й знижує витрати на доочищення та сортування.

Оптимізація геометрії барабана та впровадження регульованого приводу забезпечують підвищення продуктивності установки на 15–25 % і одночасне зменшення споживання електроенергії на 10–12 %, що сприяє скороченню експлуатаційних витрат та пришвидшенню термінів окупності модернізації.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 32 найменувань.

Загальний обсяг роботи становить 35 сторінок комп'ютерного тексту, містить 5 рисунків та 1 додаток.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА

Післязбиральна обробка зерна починається з приймання його на зернопункті, де проводять первинний огляд зовнішнього вигляду партії. Працівники візуально оцінюють колір, запах та ознаки пошкодження шкідниками або пліснявою. Одночасно перевіряють документальне підтвердження походження зерна та відповідність його сорту. Після візуального огляду відбирають лабораторну пробу масою 1–2 кг для подальших випробувань. Ця проба надходить у спеціалізовану лабораторію, де визначають вологість, смітєву домішку та однорідність зерна. За результатами аналізу приймають рішення про подальші операції обробки: очистку, сушіння, калібрування. Якщо вологість зерна перевищує нормативні значення, безпосередньо перед очищенням проводять його сушіння. У разі виявлення високої смітєвої домішки зерно направляють на попередню сепарацію, аби знизити навантаження на основні очисні агрегати [4].

Етап очищення зерна включає механічну сепарацію, яка реалізується за допомогою сит, повітряних потоків та вібраційних машин. Спочатку продукт проходить через решітні класифікатори, що відокремлюють великі та дрібні домішки. Далі зерно надходить у аеродинамічну шафу, де під дією повітряного потоку усувають легкі домішки, такі як солома та пил. Після цього здійснюється магнітна очистка, щоб видалити металеві фрагменти. В окремих випадках застосовують електростатичний сепаратор для відділення дрібних органічних та неорганічних домішок. Результат очищення контролюють шляхом повторного відбору проб і візуального огляду. Якісний ступінь очищення має відповідати вимогам стандарту за вмістом домішок не більше 1–2 %. Після очищення зерно тимчасово накопичують у бункерах перед сушінням або безпосередньо направляють на калібрувальний етап [3].

Сушіння зерна є одним із найбільш енергоємних процесів післязбиральної обробки. Воно проводиться в періодичній або безперервній

сушарці, залежно від обсягів партії. Температурний режим сушіння підбирають з урахуванням сорту зерна та його початкової вологості. Для пшениці оптимальна температура сушильного агента становить 40–45 °С, для кукурудзи — 50–55 °С. Сушильні барабани або шахтні сушарки оснащені системами автоматичного контролю температури і вологості. Під час обробки здійснюють періодичний контроль проб, щоб запобігти перегріву та пошкодженню зародка зерна. Завершивши сушіння, продукт охолоджують до температури навколишнього середовища, пропускаючи через охолоджувальні камери або вентильовані склади. Охолодження знижує ризик конденсації вологи при подальшому зберіганні [9].

Після охолодження зерно надходить на етап калібрування, в ході якого поділяють партію на фракції за розміром та формою зернин. Для цього використовують вібраційні й ротаційні калібрувальні машини. Просіювання через сита з різним діаметром отворів дозволяє забезпечити однорідність фракцій. Фракціонування підвищує якість кінцевого продукту та спрощує подальші технологічні операції. Для деяких культур (наприклад, насіння соняшнику) застосовують додаткову калібровку за вагою зернин. Після калібрування здійснюють контроль проб з кожної фракції на відповідність параметрам розміру і якості. Однорідні фракції сприяють рівномірному висіву та кращій енергії проростання [3].

У процесі кондиціонування зерна досягають оптимального волого-температурного стану для зберігання. Кондиціонери підтримують відносну вологість повітря на рівні 60–65 % та температуру 15–20 °С. Зерно рівномірно аерується, щоб уникнути локального перегріву чи накопичення точки роси. Проводять циклічну вентиляцію з інтервалами залежно від товщини шару й початкових умов. Системи моніторингу вологості та температури автоматично регулюють потік повітря. Кондиціонування триває від 24 до 72 годин залежно від культури та початкового стану. Після завершення кондиціонування продукт готовий до тривалого зберігання в елеваторах [7].

Наступним кроком є транспортування зерна між окремими технологічними ділянками. Для цього використовують норії, конвеєри й шнеки. Норії забезпечують вертикальний підйом зерна, шнеки — горизонтальний транспортування, а конвеєри — складну трасу переміщення. Всі транспортні пристрої обладнані датчиками рівня й швидкості потоку зерна. Забезпечують герметичність систем, щоб запобігти втратам та забрудненню навколишнього середовища. Перед кожним включенням перевіряють натяг стрічок, стан підшипників і чистоту робочої середовища. Своєчасне обслуговування транспортних ліній є критичним для безперервності всього процесу [1].

Зберігання зерна здійснюється в силосах або елеваторах різного типу: металевих, залізобетонних чи сталевих. Перед закладкою партію контролюють за показниками вологості, температури та наявності шкідників. Максимальна допустима вологість для тривалого зберігання пшениці становить 14 %, ячменю — 13 %, кукурудзи — 14,5 %. Силоси обладнані системами аерації та вентиляції, що підтримують однорідний мікроклімат. Для виявлення шкідників застосовують феромонні пастки та періодичні лабораторні дослідження. У разі підвищення температури або вологості автоматично вмикаються охолоджувальні або осушувальні агрегати [6].

Контроль якості продукту на всіх етапах проводять за допомогою систем HACCP і ISO 9001. Документування кожного циклу обробки здійснюється в електронних журналах. Автоматизовані системи управління технологічним процесом (SCADA) фіксують параметри: температуру, вологість, швидкість потоку та інші. В разі відхилення від заданих меж запускаються аварійні алгоритми, які коригують роботу обладнання або дають сигнал оператору. Програмне забезпечення зберігає історичні дані для аналізу та оптимізації. Аналітичні звіти допомагають удосконалювати регламенти проведення операцій [3].

При обробці зерна важливо дотримуватися санітарно-гігієнічних норм. Кожного дня приміщення піддають вологому прибиранню та дезінфекції. Поверхні устаткування очищають від залишків матеріалу та пилу. Періодично

виконують фумігацію для знищення шкідників. Працівники повинні мати індивідуальні засоби захисту: респіратори, окуляри, рукавиці. Проводять регулярні інструктажі та медичні огляди. В разі аварійних ситуацій — розливу палива чи витоків газів — мають бути готові до негайної евакуації та використання вогнегасників [2].

Енергетична ефективність процесу забезпечується рекуперацією тепла з відпрацьованих газів сушарок. Теплообмінники дозволяють використати до 60 % теплової енергії для попереднього підігріву вхідного повітря. Застосування сучасних котлоагрегатів з високим ККД знижує витрати палива. Використання альтернативних джерел енергії (біогаз, Сонячні колектори) доповнює основну систему опалення. Моніторинг споживання енергії ведеться в реальному часі, що дозволяє швидко виявляти надлишкові витрати. Оптимізація режимів роботи значно знижує експлуатаційні витрати [7].

Автоматизація ключових вузлів процесу післязбиральної обробки сприяє підвищенню продуктивності та якості. Роботизовані системи відбору проб забезпечують регулярний контроль без залучення оператора. Інтелектуальні алгоритми прогнозують потребу в сушінні на основі метеоданих та даних вологості. Застосування штучного інтелекту дозволяє оптимізувати режими очищення та калібрування. Автоматизація транспортування мінімізує людський фактор та зменшує втрати зерна. Інтеграція з ERP-системами гарантує прозорість обліку та логістики [3].

Управління складом зерна здійснюють із використанням RFID-міток та QR-кодів. Кожна партія отримує унікальний ідентифікатор із зазначенням дати обробки та вихідних параметрів. Це забезпечує трасування продукції від поля до споживача. У разі виявлення невідповідності можна оперативно відстежити джерело проблеми. Система обліку автоматично формує звіти для контролюючих органів. Інтеграція з мобільними додатками дозволяє менеджерам віддалено моніторити запаси [2].

З урахуванням кліматичних умов регіону, де застосовується технологія, коригують параметри сушіння та зберігання. У вологому кліматі активніше

використовують осушувальні установки та подовжують період кондиціонування. У жарких регіонах збільшують обсяги охолодження та аерації силосів. Сезонне коригування режимів дозволяє уникнути псування зерна. Адаптація технології під місцеві умови підвищує резерв термінів зберігання. Це особливо актуально для експортних партій [3].

Технічне обслуговування обладнання проводять відповідно до регламентів виробника. Профілактичні ремонти виконують у міжсезоння, щоб уникнути простоїв у період активної обробки. Кожна машина має журнал обслуговування з історією ремонту та заміни деталей. Використання оригінальних запасних частин продовжує строк служби агрегатів. Модернізація вузлів із застосуванням датчиків IoT дозволяє прогнозувати відмову заздалегідь. Це знижує ризик аварійних зупинок та зменшує витрати на ремонт.

Навчання персоналу є невід'ємною складовою ефективності післязбиральної обробки. Проводять внутрішні тренінги за технологічними картами та регламентами. Працівники проходять атестацію з охорони праці та технологічних процесів. Регулярні тренування з ліквідації аварійних ситуацій підвищують готовність до нештатних випадків. Використовують VR-симулятори для відпрацювання операцій у безпечному середовищі. Такий підхід зменшує кількість помилок під час реальної роботи.

Аналітика великих даних (Big Data) дозволяє оцінювати ефективність всієї системи в динаміці. Мікродані з датчиків температури, вологості та потоку зерна обробляють у хмарних сервісах. На основі машинного навчання створюють прогностичні моделі ризиків псування. Це допомагає планувати технічне обслуговування обладнання та графік роботи. Інтеграція з логістичними платформами оптимізує маршрути доставки готової продукції [5].

В умовах аграрного бізнесу важливо враховувати економічні аспекти процесу. Капітальні інвестиції в сучасні сушарки та силоси відбуваються протягом 3–5 років. Окупність проекту на рівні 4–6 років вважається прийнятною. Економічний аналіз включає витрати на енергоносії,

обслуговування та оплати праці. Використання альтернативних джерел енергії може суттєво зменшити змінні витрати. Планування бюджету базується на прогнозах врожайності та ринкових цін [4].

У підсумку, технологічний процес післязбиральної обробки зерна складається з низки взаємопов'язаних етапів: приймання, очищення, сушіння, охолодження, калібрування, кондиціювання, зберігання та транспортування. Кожен із них має свої технологічні вимоги та критерії якості. Сучасні автоматизовані системи і аналітика дають змогу підвищувати продуктивність та знижувати витрати. Дотримання санітарно-гігієнічних норм і регламентів обслуговування гарантує безпечність продукту. Інтегрований підхід забезпечує економічну ефективність і конкурентоспроможність на ринку [8].

РОЗДІЛ 2

ТИПИ ЗЕРНОВИХ СУШАРОК

За способом подавання та обробки партій зерна сушарки діляться на пакетні та безперервні. У пакетних апаратах зерно подається великими порціями, висушується до заданої вологості й лише після завершення обробки вивантажується, що забезпечує точний контроль вологості, але викликає перерви в роботі. Безперервні сушарки приймають зерно безперервним потоком, одночасно завантажуючи й вивантажуючи його з камери, що підвищує продуктивність і зменшує простої. До пакетних належать шахтні сушарки з поетапним пересуванням зерна, тоді як безперервні моделі охоплюють барабанні, баштові, псевдозріжені й інші конструкції. Вибір типу залежить від обсягів партії, точності регулювання вологості й наявності енергоресурсів. Пакетні сушарки мають меншу вартість спорудження, але через цикли розігріву й охолодження виявляються дорожчими в експлуатації. Безперервні апарати вимагають складнішого обслуговування та точного автоматичного контролю режимів. При обробці невеликих партій (до 10 т) частіше застосовують пакетні моделі, для великих елеваторів (понад 50 т/год) обирають безперервні [2-4].

Роторні барабанні сушарки є найпоширенішим типом безперервних апаратів. Їхня конструкція складається з обертового циліндричного барабана, всередині якого зерно рухається за рахунок нахилу корпусу й спеціальних насадок. Гарячий агенти подаються всередині барабана паралельно або назустріч потоку матеріалу, що дозволяє регулювати інтенсивність сушіння. Простота конструкції й висока продуктивність роблять їх популярними на елеваторах та млинах. Ступінь нагріву й час перебування зерна можна коригувати шляхом зміни кута нахилу й частоти обертання барабана. Вкладки можуть бути лопатевими, секторними або перевалочними, що дозволяє адаптувати процес до різних культур. Недоліком є великі габарити й високе

енергоспоживання за недостатньої термоізоляції. Новітні моделі обладнують рекупераційними теплообмінниками й системами автоматичного регулювання.

Прямоточні барабанні сушарки характеризуються одночасним рухом повітря та зерна в одному напрямку. Це забезпечує контакт найгарячіших газів із найвологішим матеріалом, що запобігає перегріву зародка. Інтенсивність сушіння висока, але теплові втрати з відхідними газами значні. Щоб підвищити енергоефективність, часто встановлюють рекуператори або подвійні контури циркуляції агента. Ці апарати прості в обслуговуванні, проте менш гнучкі в налаштуванні під різні фракції зерна. Вони доцільні для культур із високою початковою вологістю й термостійкістю. Температурний режим зазвичай лежить у діапазоні 120–200 °С. Частота обертання барабана становить 5–15 об/хв для забезпечення потрібного часу контакту.

Протиточні барабанні сушарки забезпечують зустрічний рух повітря й зерна. Це дозволяє віддавати тепло вже висушеному матеріалу, що зменшує енергетичні витрати. Точність контролю вологості в кінці камери вища, але ризик пересушування початкових шарів збільшується. Для вирівнювання температурного поля використовують багатозонні насадки й заслінки. Протиточні моделі рекомендовані для цінних культур, де потрібна максимальна якість зерна. Вони можуть працювати в дво- або чотиризонному режимі з незалежним підігрівом для кожного сегмента. Незважаючи на високу вартість, такі сушарки економічно виправдані при великих обсягах. Ефективність рекуперації тепла сягає 50–60 %.

Змішане (міксфлоу) спрямування потоку поєднує прямоток і контрфлоу. Частина гарячого агента рухається назустріч зерну, інша — у тому ж напрямку, що дозволяє оптимізувати швидкість сушіння й зменшити теплові витрати. Барабани обладнують складною системою розподілу потоків і багатозонними заслінками. Змішаний режим забезпечує рівномірну сушку часток із різною вологістю та розміром. Така універсальність дозволяє обробляти широкий спектр культур — від пшениці до сої. Регулювання відношення потоків здійснюють ручними або автоматичними заслінками. Експлуатаційні витрати в

середньому нижчі, ніж у прямоточних аналогів. Міксфлоу моделі дедалі частіше встановлюють у великих елеваторних комплексах.

Індуковані (непрямі) барабанні сушарки ізолюють зерно від продуктів згоряння: тепло передається через стінки кожуха або трубчастих пучків. Це важливо для продовольчих зерен, оскільки виключає забруднення димовими газами. Нагрів здійснюється парою, гарячою водою або термомаслом. Висока термоізоляція корпусу знижує теплові втрати. Продуктивність трохи нижча, ніж у прямоточних апаратів, через обмежену швидкість теплопередачі. Такі сушарки використовують для попереднього підігріву або делікатних культур — рису, насіння льону. Обслуговування потребує знань щодо систем теплопередачі. Енергоефективність становить близько 70–80 %.



Рис. 2.1. Італійська шахтна зерносушарка Scolari.

Шахтні баштові сушарки представляють собою вертикальні колони, де зерно рухається вниз під власною вагою через шари нагрітого повітря. Висока продуктивність досягається за рахунок товстого шару матеріалу та компактної площі установки. Застосовуються прямо- або протиточні схеми подавання агента. Велика висота забезпечує значний час контакту при низькій

температурі, що запобігає пошкодженню зародка. Конструкція потребує міцних опор і обмежує мобільність. Часто застосовують попередні вентиляційні камери і рекуператори. Баштові моделі підходять для елеваторів із обмеженою площею. Вони можуть інтегруватися із силосними ємностями.

Перфоровані шахтні сушарки мають стінки або тарілки з отворами, через які проходить нагріте повітря. Це забезпечує рівномірний розподіл агента по всьому поперечному перерізу зернової маси. Перфорація зменшує утворення “мертвих зон” і підвищує ефективність теплообміну. Такі апарати підходять для круп’яних продуктів, насіння соняшнику та кондитерської сировини. Регулювання подачі повітря виконують ступінчастими заслінками або автоматизованими клапанами. Кількість секцій і їх висоту підбирають залежно від продуктивності. Перфоровані моделі менш енергоємні, але вимагають регулярного очищення отворів від пилу.

Сушарки з псевдозрідженим шаром утворюють в камері шар дрібного зерна, що підтримується потоком повітря знизу. Цей принцип забезпечує інтенсивний тепло- та масообмін, рівномірну температуру й короткий час контакту. Флюїд-шар дозволяє обробляти пилоподібні й крихкі матеріали з мінімальними пошкодженнями. Основні вузли включають розподільну решітку й камеру з циркуляційною системою. Температурний режим регулюють зміною швидкості потоку та температури агента. Для дрібних круп вибирають низькотемпературні режими до 60 °C. Недоліком є високе енергоспоживання та складність підтримки рівня зерна. Часто застосовують рекуперацію тепла з відхідних газів.

Сушарки з перевалочною насадкою поєднують властивості барабанних і шахтних апаратів. Матеріал пересипається через ряд замкнених комірок, що забезпечує інтенсивне перемішування та контакт із агентом. Вставки можуть бути встановлені уздовж усього барабана або шахти. Перевалочні насадки зменшують ефект шарового потоку й покращують однорідність вологості. Такі моделі універсальні й працюють у горизонтальному або вертикальному виконанні. Налаштування комірок дає змогу регулювати час перебування та

його розподіл. Використовують для спеціальних насіння та фракційної обробки. Модульна конструкція спрощує монтаж і технічне обслуговування.

Бінові (силосні) сушарки дозволяють сушити зерно прямо в силосах або бункерах, пропускаючи агент через шар насипу. Пересипання між бін-блоками або безперервний потік забезпечують безперервну обробку. Цей спосіб підходить для елеваторів із стаціонарними силосами, де окрема сушильна камера не потрібна. Температуру й інтенсивність вентиляції керують автоматикою. Бінові установки компактні й недорогі в монтажі, але мають обмежену продуктивність до 15 т/год на секцію. Час обробки може досягати 10–12 годин. Для підвищення ефективності шар просушують частинами, переміщуючи зерно між секціями. Метод зручний для невеликих партій і зерна з низькою вологою.

Мобільні сушарки змонтовані на шасі або трейлері й можуть пересуватися між полем, елеватором і автозавантажувачами. Вони оснащені генератором гарячого повітря, вентилятором і системою управління. Після збирання врожаю сушарку розміщують поруч із комбайном, що знижує витрати на транспортування. Потужність таких моделей невелика — до 10 т/год, але вони мають високу гнучкість застосування. Не потребують будівництва стаціонарних приміщень. Енергопостачання здійснюється через швидкоз'ємні фітинги до газу чи дизеля. Обслуговування спрощене завдяки доступу з усіх боків корпусу. Залежність від дорожніх умов і обмеження за вагою є головними недоліками.

Конвеєрні стрічкові сушарки транспортують зерно довгою жаростійкою перфорованою стрічкою під потоком гарячого повітря. Це дозволяє поступово регулювати час сушіння й температуру в різних зонах стрічки. Стрічка виготовлена зі спеціальних високотемпературних матеріалів. Конвеєрні моделі компактні за висотою, але довжина може сягати десятків метрів. Використовують у малих і середніх млинах для вузькоспеціалізованих культур. Перевага — простий доступ до матеріалу й легке обслуговування. Недолік — обмежена механічна міцність стрічки й ризик пошкодження зерна. Регулювання

температури й швидкості здійснюється за допомогою щитів керування або частотних перетворювачів.



Рис. 2.2. Конвеєрна сушарка.

Мікрохвильові сушарки використовують електромагнітне випромінювання для нагріву молекул води всередині зерна. Це суттєво скорочує час сушіння та знижує енергоспоживання за невеликих потужностей. Однак високі капітальні витрати й складність конструкції обмежують їхнє застосування переважно в лабораторіях та великих елеваторних комплексах. Мікрохвилі можуть пошкоджувати білкову структуру, тому режими роботи суворо нормуються. Зазвичай їх поєднують із повітряною досушкою у дво- чи триетапних циклах. Перевага — точний контроль вологості за допомогою діелектричних датчиків. Головною перешкодою є необхідність екранування для безпеки персоналу.

Інфрачервоні сушарки нагрівають поверхню зерна тепловим випромінюванням ІЧ-ламп або світлодіодних джерел. Випромінювання

проникає в верхній шар частинок, викликаючи інтенсивне випаровування вологи без значного механічного впливу. Інфрачервоні модулі часто використовують як переддосушувальний етап перед основним потоком повітря чи барабаном. Світлодіодні нагрівачі забезпечують довготривалу роботу й відносно низьке енергоспоживання. Однією з особливостей є можливість точкового обігріву заданих зон. Обмежена глибина проникнення випромінювання й висока вартість монтажу є недоліками.



Рис. 2.3. Інфрачервона сушарка барабанного типу.

Комбіновані сушарки поєднують дві й більше технології, наприклад прямоточний барабан із ІЧ-ділянкою чи псевдозріджений шар із мікрохвильовим модулем. Це дозволяє поєднати швидкість та якість сушіння, скорочуючи час циклу. Кожен блок керується окремо, що дає змогу оптимізувати режими обробки різних культур. Основні виклики — синхронізація потоків і складність автоматики. Проте економічний ефект від такої інтеграції часто перевершує суму окремих частин. Комбіновані установки встановлюють у великих агрокомплексах з високим рівнем індивідуалізації

процесу. Інвестиційна вартість вища, але окупність настає швидше завдяки зменшенню втрат зерна.

Акумуляційні сушарки використовують теплоаккумулятори з каменю або кераміки, які розігріваються під час роботи й віддають тепло в нічний час чи при пікових навантаженнях. Це дає змогу знизити витрати на дорогі енергоресурси та використовувати електроенергію за нічними тарифами. Теплоаккумуляційні блоки встановлюють перед основним сушильним барабаном або в контурі шахтної сушарки. Цикли акумуляції й віддачі тепла програмуються автоматично. Системи особливо ефективні в регіонах із різкими коливаннями цін на енергію. Основний недолік — великі габарити й маса теплоаккумуляторів. Обслуговування потребує фахових знань із теплоаккумуляційних технологій.

Контактні сушарки мають нагріті металеві вали, стрічки або лопаті, які безпосередньо контактують із зерном. Такий метод забезпечує миттєве нагрівання й швидке випаровування вологи. Контактні елементи використовують у комбінації з повітряними потоками для запобігання налипанню та утворенню пилу. Обладнання складне в очищенні й вимагає термостійких матеріалів. Перевага — скорочений час сушіння до 5–10 хв. Такий підхід застосовують для спеціальних культур із високою доданою вартістю. Для безпеки використовують датчики перекриття та термічний захист.

Гідродинамічні сушарки застосовують рідкий теплоносіє (воду або термомасло) у трубному пучку всередині шахти чи барабана. Рідина підігрівається в котлі й циркулює під тиском, передаючи тепло через кожух. Це виключає прямий контакт із продуктом і знижує ризик окиснення зерна. Такі системи використовують для ліній переробки олійних культур. Температурний режим регулюють зміною тиску та швидкості циркуляції теплоносія. Необхідність насосного обладнання й контролю герметичності є складністю. Водночас енергоефективність висока, а викиди в атмосферу відсутні.

Індукційні сушарки працюють за допомогою електричних індукційних нагрівачів, що створюють змінне магнітне поле й нагрівають металеві вкладиші або лотки. Ці елементи передають тепло зерну через контакт із поверхнею. Індукційний принцип дає змогу швидко змінювати потужність і точно контролювати температуру. Такі сушарки компактні й безпечні — немає відкритого вогню. Використовують їх головним чином для малих партій і лабораторних досліджень. Недоліком є висока вартість інверторного обладнання та потреба в стабільному електроживленні. Енергоефективність може досягати 90 % [2-7].

Сушарки з вентилятором на частотному перетворювачі дозволяють точно регулювати об'єм подачі повітря й тиск у камері. Використання VFD дає змогу оптимізувати режим для різних культур і обсягів зерна. Зміна швидкості потоку безпосередньо впливає на інтенсивність сушіння та енергоспоживання. Такі системи легко інтегруються з PLC та SCADA. Плавний пуск і регулювання зменшують навантаження на механіку. Використання VFD також сприяє зниженню шуму та зношування підшипників. Економія електроенергії може сягати 20–30 % [3-9].

Сушарки з рекуперацією тепла від відхідних газів оснащені теплообмінниками, які повертають тепло вхідному повітрю. Відпрацьовані гази проходять через пластинчасті або кожухотрубні теплообмінники й нагрівають первинний потік. Це суттєво знижує витрати на нагрів і підвищує загальну енергоефективність. Рекупераційні блоки можуть бути зовнішніми або вбудованими в конструкцію сушарки. Частка поверненого тепла досягає 40–60 %. Основні виклики — додаткові гідравлічні опори й збільшений гідравлічний тиск. Проте економія палива та зниження викидів роблять такі рішення привабливими для екологічних проєктів [3-9].

Двоступеневі сушарки мають попередню й основну зони сушіння з різними тепловими режимами. Спочатку зерно проходить низькотемпературний контур для видалення частини вологи, а потім потрапляє у високотемпературну зону. Це знижує температурне навантаження на частки й

покращує збереження зародка. Для кожної зони передбачені окремі вентилятори й пальники. Автоматика контролює перехід зерна між зонами й підтримує оптимальний перепад температур. Широко застосовують для обробки кукурудзи та рису. В кінці передбачено охолоджувальну секцію для стабілізації зерна перед зберіганням. Це покращує якість продукту й знижує енергоспоживання [3-9].

Канальні насадки в сушарках створюють багатовекторний потік газу через внутрішні канали барабана. Це забезпечує інтенсивний теплообмін і зменшує “мертві зони”. Канальні вставки дозволяють регулювати параметри в кожній секції барабана. Такі апарати застосовують для круп і спеціального насіння, де потрібна висока однорідність. Обслуговування вимагає очищення каналів від пилу та осаду. Ефективність масообміну сягає 85–90 %, що значно вище за звичайні вкладки. Габарити вставок підбирають залежно від продуктивності та властивостей зерна [3-9].

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗДІЛ

Установки барабанної сушіння (див. рис. 3.1) призначені для здійснення безперервного процесу сушіння під атмосферним тиском матеріалів великої фракції, зернистих та сипких (зокрема мінеральних солей, фосфоритів тощо).



Рис. 3.1/ Барабанна сушарка.

Барабанна сушарка виконана у вигляді циліндричного барабана, встановленого під невеликим кутом до горизонтальної осі (1:15–1:50) та опертого через бандажі на рольгангах. Обертання барабана забезпечується електродвигуном через зубчасту передачу та редуктор і підтримується на рівні 5–8 об/хв, а його осьове положення контролюють упорні ролики. Сировину подають у барабан за допомогою живильника, де вона спочатку підсушується під дією лопатей приймально-гвинтової насадки, а далі надходить на поздовжню внутрішню насадку, що простягається майже на всю довжину барабана.

Внутрішня насадка гарантує рівномірне розсіювання й інтенсивне перемішування матеріалу в поперечному перерізі барабана, забезпечуючи щільний контакт частинок із гарячими топковими газами під час їх просипання. Зазвичай гази та матеріал рухаються прямою токою, що дозволяє уникнути

перегріву, адже найтепліші гази взаємодіють із найвологішою сировиною. Щоб зменшити винос пилу, гази пропускають через барабан за допомогою вентилятора зі швидкістю 2–3 м/с, а перед викидом у атмосферу очищають у циклоні. На торцях барабана часто монтують лабіринтові ущільнювачі для мінімізації втрат сушильного агента.

На розвантажувальній секції барабана змонтовано регулювальний елемент у вигляді суцільного обідка або обруча з поворотними лопатями (жалюзі), розташованими кільцеподібно. Він призначений для підтримання заданого рівня завантаження—зазвичай не більше 20 % об'єму барабана. Длительність перебування частинок у камері визначається швидкістю обертання барабана, а в окремих випадках — також кутом його нахилу. Після завершення сушіння матеріал виводиться через розвантажувальний патрубок, обладнаний герметизуючим вузлом, який перешкоджає підсосуванню зовнішнього повітря, що інакше призвело б до даремного збільшення продуктивності та енергоспоживання вентилятора.

Внутрішня конструкція барабана змінюється залежно від фракції й властивостей сировини. Для великих кусків та липких матеріалів застосовують лопаткові насадки підйомного типу, для щільних і малосипучих— секторні. Дрібні сипкі фракції ефективніше сушити за допомогою розподільних пристроїв, а пилоподібні тонкоподрібнені матеріали — у барабанах із замкненими комірчастими насадками перевалочного типу. Іноді в одному апараті комбінують різні насадки — наприклад, підйомно-лопатеву в передній частині та розподільну в центральній. Промислова номенклатура барабанних сушарок включає апарати прямоточного та протиточного типу з використанням повітря або газових теплоносіїв, контактні барабанні сушарки та інші спеціалізовані конструкції.

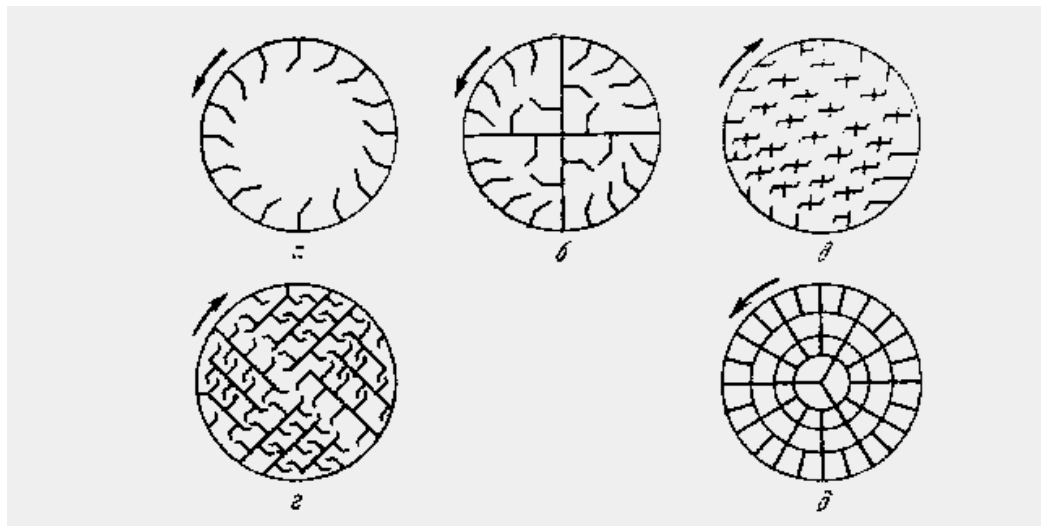


Рис. 2. Наведені різновиди насадок для барабаних сушарок: а – підйомно-лопатева, б – секторна, в і г – розподільні, д – перевалочна.

Підготовчі роботи перед запуском включають огляд усіх вузлів і механізмів на справність та холостий пуск без завантаження матеріалу. Особливу увагу приділяють перевірці автоматики керування шлюзовим затвором охолоджувальної колонки: натискають на верхній датчик, перекриваючи контактний клапан у зернозливній трубі — якщо затвор почне обертатися й зупиниться відразу після скидання тиску на мембрану, система вважається справною. Після успішного холостого ходу та перевірки всіх механічних вузлів розпалюють топкову камеру. Коли стабілізується процес горіння, вмикають вентилятор і протягом 10–15 хв прогрівають барабан. Далі важіль блокування клапанів переводять у положення «сушка». Під час прогріву температуру теплоносія тримають на 15–20 °С нижче рекомендованої для обробки завантаженого матеріалу, коригуючи її заслінкою подачі теплоносія та регулюванням кількості палива.

Після попереднього прогріву сушильного барабана запускають завантажувальну норію та починають обкатку агрегату під робочим навантаженням. Як тільки оброблений матеріал надходить до розвантажувального елеватора, температуру теплоносія доводять до встановленого технологічного показника. Якщо рівень зерна в охолоджувальній колонці перевищує половину об'єму, увімкнюють її вентилятор та привод відповідного транспортера. Контроль нагрівання зерна

здійснюють шляхом періодичного відбору проб (0,75–1,0 кг) з-під шлюзового затвора розвантажувальної камери: зерно акуратно поміщають у закриті дерев'яні ємності й витримують термометр у пробі протягом 7–10 хв.

У процесі роботи також здійснюють відбір контрольних зразків із охолоджувальної колонки – до та після сушіння – для визначення вологості, схожості, енергії проростання (для продовольчого зерна) або вмісту клейковини. Регулювання завантаження барабана зерном підтримує його заповнення на рівні 20–25 % об'єму. Паралельно кожні 15–20 хв вимірюють температуру теплоносія та, за потреби, коригують її заслінкою на трубопроводі подачі й регулюванням подачі палива.

Габаритні параметри барабана. Об'єм сушильного барабана (V_b , м^3) розраховують за наступним рівнянням:

$$V_b = \frac{m_1 \cdot \tau}{\rho_m \cdot \eta}, \quad (3.1)$$

де m_1 — проектна пропускна здатність сушарки (кг/год);

η — ступінь заповнення барабана зерном;

τ — тривалість сушіння (год);

ρ_m — щільність сухого матеріалу ($\text{кг}/\text{м}^3$).

При $\tau = 0,0833$ год, $\eta = 0,5$, $\rho_m = 750 \text{ кг}/\text{м}^3$ для зернових та $m_1 = 20000 \text{ кг}/\text{год}$ за цих умов отримуємо

$$V_b = \frac{20000 \cdot 0,0833}{750 \cdot 0,5} = 4,47 \text{ м}^3$$

Для обчислення діаметра барабана D_b виходять із об'єму, застосовуючи відповідне рівняння:

$$V_b = \pi \cdot D_b^2 \cdot l / 4, \quad (3.2)$$

де l — відстань барабана, м.

У практичній експлуатації зазвичай застосовують відношення довжини барабана до його діаметра l/D_b . Якщо $l/D_b = 3,5$, У такому разі об'єм барабана визначається єдиною величиною — його діаметром:

$$V_b = 3,5 \cdot \pi \cdot D_b^3 / 4 \quad (3.3)$$

Маємо:

$$D_b = \sqrt[3]{\frac{4V_b}{3,5 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 4,47}{3,5 \cdot 3,14}} = \sqrt[3]{1,61} = 1,17 \text{ м.}$$

Довжина барабана

$$l = 3,5 \cdot D_b = 3,5 \cdot 1,17 = 4,095 \text{ м.}$$

Визначення товщини стінки корпусу:

$$s_1 = (0,007 \dots 0,01) D_6 = 8,2 \dots 11,7 \text{ мм,}$$

Приймаємо $s_1 = 10 \text{ мм.}$

Проектування приводу. Обчислюємо оптимальну частоту обертання барабана:

$$n = \frac{4}{\sqrt{D_a}} \div \frac{8}{\sqrt{D_a}}, \text{ об/хв.} \quad (3.4)$$

де D_6 – номінальний діаметр зовнішньої поверхні барабана.

$$n = 4 / \sqrt{1,17} \div 8 / \sqrt{1,17} = 3,70 \div 7,40, \text{ об/хв.}$$

Звідки $n = 5 \text{ об/хв}$

Потужність, потрібна для привідного механізму.:

$$N_{\gamma} = 0,0013 \cdot D_A^3 \cdot L_A \cdot n \cdot \sigma \cdot \rho_H, \text{ кВт} \quad (3.5)$$

де σ – коефіцієнт потужності; L_6 – довжина барабана, ρ_H – об'ємна щільність сушеної сировини в насипному стані.

$$N_{\gamma} = 0,0013 \cdot 1,17^3 \cdot 4,095 \cdot 5 \cdot 750 = 2,2 \text{ кВт,}$$

Врахувавши ККД, потужність двигуна становитиме:

$$N = 1,3 N_{\gamma} = 1,3 \cdot 2,2 = 2,9 \text{ кВт,}$$

Обираємо електродвигун моделі 112М8 із синхронною швидкістю 750 об/хв та потужністю 3 кВт, після чого розраховуємо загальне передавальне відношення:

$$i = \frac{n_{дв}}{n}, \quad (3.6)$$

$$i = \frac{750}{5} = 150.$$

Приймаємо передавальне відношення редуктора $i_r = 20$. Розрахунок крутного моменту на валу електродвигуна проводимо за формулою:

$$T_1 = \frac{N_{\gamma}}{\omega_1}, \quad (3.7)$$

де ω_1 – кутова частота обертання вала електродвигуна.

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \frac{\pi n}{30}, \text{ c}^{-1} \\ \omega_1 &= \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ c}^{-1}, \\ T_1 &= \frac{9000}{78,5} = 114,6 \text{ Нм.}\end{aligned}\tag{3.8}$$

Обертальний момент на вихідному валу редуктора:

$$\begin{aligned}T_2 &= T_1 \cdot i_p, \\ T_2 &= 114,6 \cdot 20 = 2292 \text{ Нм.}\end{aligned}\tag{3.9}$$

Виконуємо підбір двоступеневого редуктора Ц2У-250, який забезпечує номінальний обертовий момент на вихідному валу 4000 Н·м

Головним компонентом барабанної сушарки є обертовий циліндричний корпус – горизонтальний або з невеликим нахилом – всередині якого рухається, переміщується й висушується сипкий матеріал. Усередині барабана встановлюють спеціальні вставки різної конструкції (підйомно-лопатеві, розподільні, концентричні, перфоровані, каналні тощо), що підвищують ефективність теплообміну з продуктом. Вибір типу насадок обумовлюється технологічними вимогами процесу сушіння.

Ключовою характеристикою барабана є його вологовіддача A , яка коливається в межах 6–44 кг/(м³·год). Значення залежить від ступеня завантаження й швидкості обертання, фізико-теплових властивостей та розмірів часток, а також від параметрів сушильного агента – температури, вологості й швидкості руху газового потоку.

Модифікація приводу й геометрії барабана дозволяє забезпечити:

1. інтенсивне й однорідне сушіння завдяки щільному контакту між матеріалом і сушильним агентом;
2. вологовіддачу понад 100 кг/(м³·год);
3. компактність конструкції установки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання роботи підтверджено, що модернізація внутрішніх вставок барабана сприяє значному покращенню інтенсивності тепло- та масообміну. Поєднання підйомно-лопатевих, секторних та канальних елементів забезпечує більш рівномірний розподіл зерна по перерізу барабана й зменшує розсіювання часу перебування матеріалу в сушильному просторі. Це дозволяє уникнути локального пересушування чи недосушування окремих фракцій та підвищує однорідність вологості готового продукту.

Оптимізація геометрії барабана шляхом коригування співвідношення його довжини до діаметра дала змогу збільшити пропускну здатність установки без погіршення якості сушіння. Зі збереженням загального об'єму сушарки та більш ефективним використанням внутрішнього простору модернізований корпус сприяє зниженню теплових втрат та зменшенню витрат на опалення агента сушіння. У свою чергу, адаптація приводу з можливістю регулювання передавального числа забезпечує стабільну частоту обертання барабана при різних навантаженнях.

Впроваджена система автоматичного контролю за заповненням барабана на рівні 20–25 % об'єму дозволяє підтримувати оптимальний контакт зерна з сушильним агентом і мінімізувати винос пилу. Це поліпшує енергоефективність роботи вентилятора та знижує витрати на додаткове очищення відпрацьованих газів. Завдяки регулюванню кута нахилу барабана та швидкості його обертання забезпечується оперативне налаштування режиму відповідно до початкової вологості зерна й технологічних вимог.

Розроблені рекомендації з модернізації можна легко інтегрувати в уже наявні установки, що забезпечить швидке відновлення інвестицій та підвищить конкурентоспроможність підприємства на ринку зерносушіння. Такий підхід дозволяє зменшити час простоїв під час монтажу нових ґрат або редуктора і підтримувати безперервність технологічного процесу. Крім того, можливість поетапної модернізації дає гнучкість у плануванні капітальних витрат.

Отже, запропоновані заходи з удосконалення конструкції барабанної сушарки від оптимізації внутрішніх вставок до модернізації приводу й геометрії корпусу забезпечують комплексне підвищення якості післязбиральної обробки зерна. Реалізація цих рішень сприятиме зниженню енерговитрат, підвищенню однорідності вологості готового зерна та гнучкості в управлінні режимами сушіння. Таким чином, роботи закладають надійну основу для подальшого розвитку технологій зерносушіння на вітчизняних агропідприємствах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабченко І. П. Технологія післязбиральної обробки зерна: підручник. Київ : Урожай, 2018. 340с.
2. Гуменюк Ю. В. Сушіння зернових культур: монографія. Львів : ЕкоПрес, 2019. 260с.
3. Давиденко С. М. Обладнання для зерносушарень: навч. посібник. Харків : Східно-європ. ун-т, 2020. 300с.
4. Журба О. І. Теорія і практика сушіння сипких матеріалів. Київ : Наукова думка, 2017. 220с.
5. Ковальчук В. Г. Барабанні сушарки: конструкція та експлуатація. Дніпро : ДВНЗ, 2021. 180с.
6. Лисенко М. П. Модернізація зерносушарень для підвищення енергоефективності. Чернівці : Букрек, 2022. 210с.
7. Немировський Ю. О. Основи теплообміну в сушильних апаратах. Київ : Техніка, 2016. 240с.
8. Павленко А. Д. Внутрішні насадки барабанних сушарок: вибір і розрахунок. Одеса : ОНУ, 2019. 200с.
9. Романенко І. О. Автоматизація процесів зерносушіння. Харків : Фоліо, 2020. 195с.
10. Сергієнко П. В. Оптимізація приводу сушильних установок. Київ : УкрНДІ машинобудування, 2021. 175с.
11. Сидоренко Л. І. Інтенсивність сушіння зерна: теорія та практика. Житомир : АГТУ, 2018. 160с.
12. Соловйов О. П. Технічні засоби післязбиральної обробки зерна. Київ : Урожай, 2017. 230с.
13. Терещенко Н. С. Енергозбереження в зерносушарнях. Вінниця : Нова Книга, 2022. 180с.
14. Усенко В. М. Контактні і безконтактні методи сушіння. Київ : Либідь, 2016. 150с.

15. Федієнко І. М. Моделювання тепло- і масообміну в сушарках. Львів : ННУ, 2019. 255с.
16. Хом'як О. Р. Проектування приводних механізмів барабанних сушарок. Дрогобич : Політехніка, 2020. 185с.
17. Цимбал Г. Л. Теоретичні основи сушіння сипких матеріалів. Київ : Аграрна наука, 2018. 205с.
18. Шевченко М. В. Рекуперація тепла в зерносушарнях. Запоріжжя : ЗНТУ, 2021. 190с.
19. ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги. Женева : ISO, 2015. 24с.
20. DSTU 4508-2006 Зерно — Визначення вологості. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 25с.
21. DSTU 4252-2003 Зерно — Метод визначення домішок. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 28с.
22. ASTM D 5985-17 Standard Test Method for Determination of Moisture in Grain by Near-Infrared Spectroscopy. West Conshohocken : ASTM, 2017. 12с.
23. ASAE S352.2 MAR2008 Moisture Measurement—Unground Grain and Seeds. St. Joseph : ASABE, 2008. 10с.
24. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.
25. Stroshine R. L., Saravacos G. D. Drying and Storage of Agricultural Products: Handbook. Amsterdam : Elsevier, 2018. 450с.
26. Mujumdar A. S. Handbook of Industrial Drying. Boca Raton : CRC Press, 2019. 600с.
27. Barbosa-Cánovas G. V. Engineering Properties of Foods: Monograph. New York : Springer, 2017. 380с.
28. Mujumdar A. S., Dukes R. Dryers: Foundation of Modern Technology. Cambridge : Woodhead, 2020. 320с.

29. Lewicki P.P. The Drying of Solids: Monograph. Berlin : Springer, 2018. 280с.
30. Nelson S. O. Microwave and Radio Frequency Drying of Agricultural Products: Monograph. St. Paul : ASA-CSSA-SSSA, 2017. 150с.
31. Ratti C. Advances in Food Dehydration: Monograph. London : CRC Press, 2019. 310с.
32. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.