

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра технологічних процесів та обладнання переробних і харчових
виробництв

Допущень до захисту
завідувач кафедри
к.т.н., доцент. Токарчук О.А.

(Підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

"__" _____ 2023 р.

**ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНА**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

Виконавши: студент групи 61-АІ-маг

Крох Назар Васильович

Керівник: PhD, ст. викл.

Бурлака Сергій Андрійович

Вінниця - 2023
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра технологічних процесів та обладнання переробних і харчових
виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ:
завідувач кафедри
ТОПХВ
к.т.н., доц. Токарчук О.А.

«__» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

студенту **Крох Назар Васильович**

на тему

**«ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНА»**

Затверджено Наказом по університету №187м від 2 грудня 2022 р.

Вихідні дані для підготовки роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи.
2. План-проспект магістерської роботи.
3. Підручники та навчально-методичні посібники, статистичні дані.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали, методики, матеріали ЦНТІ).
5. Методика економічної оцінки результатів досліджень.
6. Дані власних досліджень, одержаних за попередній період.

Календарний план виконання магістерської роботи

Структура роботи		Об'єм, стор.	Термін підготовки	Підпис керівника
Анотація		1	Травень 2023 року	
Вступ		3	Червень 2023 року	
Розділ 1	ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНА: ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	26	Липень 2023 року	
Розділ 2	РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ СУШКИ	14	Серпень 2023 року	
Розділ 3	ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	17	Вересень 2023 року	
Розділ 4	ПОКАЗНИКИ КЛЮЧОВИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ	13	Жовтень 2023 року	
Висновки		2	Листопад 2023 року	
Список використаної літератури		4	Квітень 2023 року – листопад 2023 року	

Термін подання роботи на кафедру

для попередньої захисту « » _____ 2023р.

Завдання видано « » _____ 2022р.

Завдання прийнявши до виконання _____ Н.В. Крох

Керівник _____ С.А. Бурлака, PhD, ст. викл.

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота містить 70 сторінок машинописного тексту. Текст записки включає вступ, чотири розділи, висновки та список літературних джерел, у тому числі 6 таблиць та 37 малюнок, використано 54 формули. Список використаних джерел містить 68 першоджерел.

Робота спрямована на дослідження та обґрунтування оптимальних конструктивних параметрів технологічного обладнання для ефективного процесу сушіння зерна. У роботі вивчаються основні аспекти сушіння зернових культур, враховуючи їх вплив на якість та зберіганість зерна. Об'єктом дослідження є різноманітні конструктивні параметри сушильних апаратів, такі як форма та розмір сушильної камери, тип вентиляційної системи, теплообмінники тощо.

У роботі проводиться аналіз існуючих технологій сушіння зерна, визначаються їх переваги та недоліки. На основі здобутих знань висувуються гіпотези щодо оптимальних конструктивних параметрів обладнання для досягнення найвищої ефективності сушіння при мінімальних енергетичних затратах.

Дослідження включає в себе експериментальні випробування різних конфігурацій сушильного обладнання, вимірювання температурних та вологості показників у процесі сушіння, а також аналіз отриманих результатів. На основі отриманих даних робиться висновок щодо оптимальних параметрів конструкції для максимально ефективного сушіння зерна.

Результати дослідження можуть мати практичне застосування у сільському господарстві, сприяючи підвищенню продуктивності та зниженню енерговитрат у процесі сушіння зернових культур. Висновки роботи можуть бути використані для оптимізації проектування та експлуатації сучасних сушильних систем.

Ключові слова: сушіння зерна, технологічне обладнання, конструктивні параметри, ефективність сушіння, зернові культури, вентиляційна система, теплообмін, енергоефективність, процес сушіння

ABSTRACT

The master's thesis contains 70 pages of typewritten text. The text of the note includes an introduction, four chapters, conclusions and a list of literary sources, including 6 tables and 37 figures, 54 formulas are used. The list of used sources contains 68 primary sources.

The work is aimed at researching and substantiating the optimal design parameters of technological equipment for an effective grain drying process. The work studies the main aspects of drying grain crops, taking into account their influence on the quality and storage of grain. The object of research is various design parameters of drying devices, such as the shape and size of the drying chamber, the type of ventilation system, heat exchangers, etc.

The work analyzes existing grain drying technologies, identifies their advantages and disadvantages. Based on the acquired knowledge, hypotheses are put forward regarding the optimal design parameters of the equipment to achieve the highest drying efficiency with minimal energy costs.

The research includes experimental tests of various configurations of drying equipment, measurement of temperature and humidity indicators during the drying process, as well as analysis of the obtained results. On the basis of the obtained data, a conclusion is made regarding the optimal design parameters for the most effective grain drying.

The results of the research can have practical application in agriculture, helping to increase productivity and reduce energy consumption in the process of drying grain crops. The conclusions of the work can be used to optimize the design and operation of modern drying systems.

Key words: grain drying, technological equipment, design parameters, drying efficiency, grain crops, ventilation system, heat exchange, energy efficiency, drying process

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	3
ВСТУП.....	7
1. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНА: ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	9
1.1 Агротехнічні вимоги для сушарок.....	9
1.1 Принципи сушіння зерна	10
1.2 Типи зерносушарок та технологія сушіння	13
1.3 Технологія сушіння зерна у рециркуляційних зерносушарках	21
2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ СУШКИ .	24
2.1 Характеристика газоповітряної суміші та стану зерна в процесі сушіння та охолодження	24
2.2 Розрахунок випареної вологи в сушильній камері.....	25
2.3 Визначення витрати повітря.....	26
2.4 Визначення витрати теплоти на сушіння	27
2.4.1 Надходження теплоти	27
2.4.2 Витрата теплоти	28
2.4.3 Тепловий баланс	29
3. ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	31
3.1 Побудова процесу сушіння на I - d -діаграмі.....	31
3.2. Розрахунок процесу охолодження зерна.....	35
3.3 Підбір вентилятора для зерносушарки.....	37
4. ПОКАЗНИКИ КЛЮЧОВИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	40

4.1 Обґрунтування режимів роботи зерносушарок та контроль за сушінням	40
4.2 Активне вентилявання зерна	42
4.3 Кількісно-якісний облік зерна під час післязбирального підробітку	43
4.4 Аналіз режимних параметрів оптимального процесу сушіння	44
ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60
ДОДАТКИ	67

ВСТУП

Сучасні економічні умови переробки сільськогосподарської продукції диктують необхідність створення ресурсозберігаючих технологій, які ефективніше використовують його харчовий потенціал. Життєво важливою галуззю АПК є переробка насіння оліємістких культур. Аналіз світових ринків оліємістких культур свідчить про те, що такі культури, як соняшник, кукурудза та соя є важливими не тільки для внутрішнього споживання, але також мають значний попит за кордонами України і є важливою складовою експорту сільської продукції. Специфікою заготовчої системи агропромислової сфери є необхідність переробки у короткий термін великої кількості продукту для забезпечення можливості його подальшого безпечного зберігання та транспортування. Найбільш поширеним способом післязбиральної термообробки є сушіння. У більшості випадків сушіння є визначним фактором при забезпеченні збереження зернового продукту. Також сушіння є досить енергоємним процесом та підвищення енергетичної ефективності на теперішній час сушарок приділяється багато уваги в Україні та світі. Крім того в Україні, також, існує проблема пов'язана з можливістю загрязнення продукту, що висушується продуктами згоряння, у разі, коли для зменшення енергетичних витрат на процес сушіння продукт висушується за допомогою суміші топкових газів з повітрям. Тому завдання розробки сушильної техніки, що забезпечує зниження енергоємності процесу при забезпеченні екологічної безпеки продукту, є доцільним і актуальним завданням.

Процеси сушіння та обладнання для їх реалізації безперервно удосконалюються. Останнім часом в Україні та світі спостерігається тенденція до розробки сушарок, що для зменшення теплових викидів передають енергію безпосередньо до продукту. Це як сушарки зі змішаним теплопідведенням, так і сушарки, що використовують різні види електромагнітного випромінювання.

Мета: Дослідження спрямоване на обґрунтування оптимальних конструктивних параметрів технологічного обладнання для сушіння зерна з метою підвищення ефективності та якості процесу сушіння.

Об'єкт дослідження: Технологічне обладнання, використовуване у процесі сушіння зернових культур.

Предмет дослідження: Конструктивні параметри технологічного обладнання для оптимального сушіння зерна з урахуванням впливу на якість та ефективність процесу.

Завдання:

1. Провести аналіз існуючого обладнання для сушіння зерна, включаючи різноманітні конструкції та технологічні рішення.
2. Визначити ключові параметри технологічного обладнання та критерії ефективності для процесу сушіння зерна.
3. Провести оцінку впливу різних конструктивних рішень на якість сушки та енергоефективність.
4. Обґрунтувати оптимальні параметри технологічного обладнання для досягнення найкращих результатів у сушінні зерна.

Наукова новизна: Це дослідження спрямоване на аналіз і обґрунтування конструктивних параметрів технологічного обладнання для сушіння зерна, що може сприяти вдосконаленню процесу сушки та оптимізації витрат енергії, забезпечуючи високу якість сушки зернових культур.

1. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНА: ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Агротехнічні вимоги для сушарок

Сушарки повинні сушити зерно та насіння без зниження якісних показників, зумовлених стандартами на насіння та зерно продовольчо-кормового призначення.

Насіння і зерно після сушіння не повинні набувати стороннього запаху. Барабанні сушарки повинні забезпечувати сушіння зерна та насіння з початковою вологістю не більше 35% з вмістом у ньому бур'яну домішки не більше 3%, у тому числі соломистої домішки.

Відхилення температури нагріву зерна та насіння в барабанних сушарках від середнього значення за перерізом шахти, у зоні максимального нагріву не повинно перевищувати + 50С для насіння, + 70С для продовольчого зерна.

Сушарки повинні забезпечувати охолодження зерна після сушіння при температурі повітря, що охолоджує, нижче 170С до температури не більше 250С, а при температурі охолоджуючого повітря вище 170С до температури, що перевищує температуру охолоджуючого повітря не більше, ніж на 80С.

Коливання заданої температури теплоносія, що надходить у сушильну камеру, при встановленому режимі роботи не повинні перевищувати 0,25%. Конструкція сушарок повинна забезпечувати можливість повного її очищення від залишків зерна та насіння, проведення дезінфекції, а також встановлення первинних датчиків контролю, сигналізації та автоматизації технологічного процесу та відбору проб для визначення якості насіння та зерна.

Барабанні зерносушарки повинні забезпечувати сушіння зерна та насіння будь-якої вологості та засміченості. Зниження вологості за один пропуск має бути не менше 6% на пшениці продовольчого призначення та не менше 3% на насінні з початковою вологістю зерна або насіння до 20%.

1.1 Принципи сушіння зерна

Сушіння зерна та насіння засноване на двох принципах:

Видалення вологи із зерна без зміни її агрегатного стану та без підведення тепла; Зі зміною агрегатного стану вологи в зерні (шляхом перетворення рідини на пару) за допомогою підведення тепла. На першому принципі заснований сорбційний спосіб сушіння, при якому вологе зерно змішується з вологопоглинаючими матеріалами (тирсою, силікагелем, хлористим кальцієм, сульфатом натрію) або з більш сухим зерном. Різновидом цього є хімічна сушіння. Її найдоцільніше застосовувати для зниження вологості насіння бобових культур (віка, горох, соя, квасоля). Внаслідок своїх морфологічних особливостей (щільні насінні оболонки) і хімічного складу (високий вміст білка) це насіння дуже погано віддає вологу при тепловій сушці. Нагрівати їх дуже не можна, оскільки вони сильно розтріскуються. Саме для таких культур і розроблено хімічний спосіб сушіння. У нашій зоні він застосовується дуже рідко, але з його технологією потрібно ознайомитися.

Метод заснований на високій водопоглинальній здатності деяких хімічних речовин, зокрема, технічного сульфату натрію (Na_2SO_4) або природного озерно-морського мінералу – мірабіліту. Ці речовини повинні мати перед використанням вологість 1-5 %. Сушіння ведуть, змішуючи порошок з насінням. При вихідній вологості зернової маси 20 % на 1 т насіння беруть 60 кг безводний порошок зазначених вище препаратів. При вихідній вологості насіння 25% беруть 120 кг на тонну, при 30% відповідно 180 кг. Змішування проводять на майданчику під навісом. Суміш насіння з препаратом потрібно регулярно перемішувати, оскільки процес відібрання води у насіння супроводжується підвищенням температури. Перемішування роблять 3-4 рази на добу.

Тривалість сушіння – 5-10 діб, залежно від вихідної вологості насіння. Після висушування сорбент відокремлюють від зернової маси на якій-небудь сепаруючій зерноочисній техніці. Препарат після використання має дуже високу вологість – 40-50%. Повторне застосування можливе тільки після його

висушування, використовуючи сушарки, або на наступний рік після висушування його на сонці.

Висока вартість та трудомісткість хімічного способу сушіння обмежує його застосування.

На другому принципі засновані контактний, радіаційний та конвективний способи сушіння та передачі тепла.

Контактний (кондуктивний) спосіб ґрунтується на безпосередньому контакті (дотику) висушуваного матеріалу з нагрітою поверхнею та одержанні тепла від неї за рахунок теплопровідності. Цей спосіб вимагає великої витрати палива, що не забезпечує необхідної рівномірності сушіння, малопродуктивний, а тому має обмежене застосування.

Радіаційний спосіб сушіння полягає в тому, що теплота підводиться до зерна, що висушується, у вигляді променистої енергії від сонячних або інфрачервоних променів. Прикладом є Повітряно-сонячне сушіння, коли волога випаровується лише через поверхню насипу зернової маси під впливом сонячної радіації та вітру. Чим тонший шар зерна, тим інтенсивніше йде його висушування. Тому при сушінні зерна пшениці та ячменю висота його шару повинна бути не більше 20 см, а для дрібнонасінневих культур – 5- 10 см.

Майданчик для повітряно-сонячного сушіння зерна повинен мати асфальтове покриття. Ґрунтові чи бетонні майданчики необхідно ізолювати від зерна плівкою, щоб уникнути зволоження його нижніх шарів від вологи ґрунту. Зерно на майданчику краще розсипати не рівним шаром, а гребенями із напрямком їх із півдня північ. У цьому випадку значно збільшується площа поверхні зернового насипу та створюється різниця в парціальному тиску водяної пари між основою та вершиною гребеня, що сприяє більш інтенсивному випаровуванню вологи.

Для успішного сушіння необхідно зернову масу періодично (через 2-3 години) перелопачувати, перемішуючи нижні шари з верхніми, що вже висушили. У разі потреби повітряно-сонячне сушіння можна продовжити і наступного дня. Тільки на ніч необхідно зібрати зерно в купу та вкрити її брезентом чи плівкою. Повітряно-сонячне сушіння широко застосовується в

господарствах південної зони внаслідок її простоти, низької трудомісткості та затратності. При цьому не тільки не потрібне дороге паливо для теплових сушарок, але й позитивно впливає на зернову масу. По-перше, у зерні енергійніше йдуть процеси післязбирального дозрівання. По-друге, при опроміненні зерна сонцем відбувається часткова або навіть повна стерилізація зернової маси від мікроорганізмів, особливо від найбільш небезпечних з них – цвілевих грибів. По-третє, важливим позитивним ефектом цього способу сушіння є знезараження зернової маси від кліщів та комах: при висоті насипу 4- 5 смв умовах Криму вони гинуть практично повністю.

Різновидом повітряно-сонячного сушіння можна вважати перекидання партії зерна зернометами та зерноавантажувачами з одного бунту в інший. Цей прийом дозволяє швидко знизити фізіологічну активність зернової маси внаслідок її підсушування та охолодження (у разі, якщо температура повітря нижче температури зерна).

Конвективний спосіб сушіння - це спосіб, при якому тепло передається зерну конвекцією від агента сушіння, що рухається (підігрітого повітря або суміші його з топковими газами). Агент сушіння поряд із передачею тепла поглинає та видаляє вологу із зерна. За цим способом працюють сушарки різних конструкцій. Теплове сушіння зерна в зерносушарках є найбільш продуктивним і технологічно ефективним, хоча й досить дорогим.

При конвективному способі теплопередачі головною технологічною характеристикою є стан шару зерна у процесі його сушіння та охолодження. Шар зерна може перебувати в нерухомому та рухомому станах.

При сушінні в нерухомому стані швидкість руху зерна дорівнює нулю, а швидкість руху агента сушіння менше критичної швидкості частинок зернової маси. Цей принцип використовують у жалюзійних, лоткових, стелажних, камерних сушарках періодичної дії та в установках для активного вентилявання. Основні параметри таких сушарок: температура агента сушіння 35-40 °С, тобто нижче за гранично допустиму температуру нагрівання зерна і насіння, знімання вологи 0,5-1,5 % за 1 год, витрата теплоти

8000-20000 кДж на випареній вологи 1 кг. Сушарки цього мають низький ККД і забезпечують необхідну рівномірність сушіння.

При сушінні в рухомому стані швидкість руху зерна більше нуля, а швидкість агента сушіння менше критичної швидкості частинок зернової маси, що висушується. Цей принцип покладено основою роботи шахтних, рециркуляційних, барабанних сушарок безперервної дії. Температура агента сушіння у цих сушарках висока, а витрата теплоти становить лише 5000-6000 кДж на 1 кг випареній вологи. Вони забезпечують швидке і рівномірне сушіння зерна та насіння.

1.2 Типи зерносушарок та технологія сушіння

У сільському господарстві переважно застосовуються шахтні та барабанні зерносушарки, які працюють як автономно, так і входять до складу зерносушильних комплексів КЗС. На хлібоприймальних підприємствах також використовують високопродуктивні рециркуляційні сушарки.

Технологія сушіння зерна у шахтних зерносушарках.

У сільськогосподарському виробництві для сушіння зерна та насіння найбільш широко використовуються високопродуктивні шахтні зерносушарки СЗШ-8, СЗШ-16 та СЗШ-16А.

Сушильна камера сушарок є вежею, у якої висота в кілька разів перевищує розміри сторін поперечного перерізу. Шахтні сушарки є установками безперервної дії. При режимі роботи зерно безперервно надходить у верхню частину шахти і також безперервно спливає з неї в нижній. Зерно рухається за рахунок сили тяжкості та сипкості зернової маси. Агент сушіння рухається уперек потоку зерна (рис. 1).

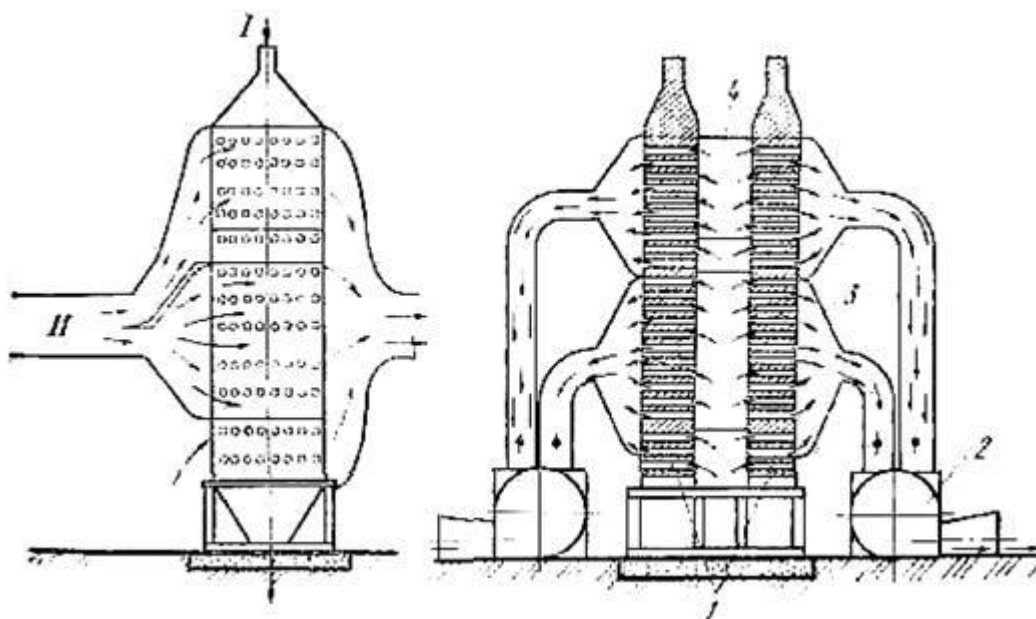


Рис. 1.1 Технологічна схема шахтної зерносушарки

1. шахти; 2. вентилятор; 3. дифузор; 4. напірна камера агента сушіння; I – зерно; II - агент сушіння

Завдяки тому, що шар зерна в шахті дещо розпушений, і зерно під час руху повертається у різних напрямках, покращується його взаємодія з агентом сушіння та прискорюється вологообмін. Швидкість руху зерна та час знаходження його у шахті регулюють за допомогою випускного пристрою. Тривалість знаходження зерна у шахті приблизно 40 хвилин, і за один пропуск його вологість знижується на 4-6 %.

Щоб сушіння зерна проходило у всьому обсязі шахти, її обладнають спеціальними каналами-коробами, які розділяють насип на окремі пласти товщиною 100-150 мм, відповідні товщині зони сушіння. До кожного такого пласту підходить свіжий агент сушіння і після насичення вологою виводиться за межі шахти. У найпростішому вигляді короб є п'ятикутним каналом з листового металу з відкритою нижньою гранню. Короба встановлюють у шахті рядами (в шаховому порядку) на всій її висоті. Для кожного короба в стінах шахти вирізаний відповідний його переріз отвір, через який підводиться свіжий агент сушіння, і в цьому випадку короб називається підводить, або відводиться агент сушіння, що відпрацював - відвідний короб. Вхідні отвори коробок, що підводять, зазвичай виходять у бік топкового

пристрою, а вихідні отвори коробок, що відводять, - в протилежну. У всіх коробок, що підводять і відводять, один торець є глухим. Число коробок, що підводять і відводять, зазвичай однакове, і вони чергуються або цілими рядами або в кожному ряду. Важлива технологічна перевага шахтних сушарок полягає в тому, що в них можна в широких межах регулювати тривалість знаходження зерна в сушильній камері і достатньо надійно забезпечувати підтримку заданого температурного режиму сушіння зернової маси.

Завдяки наявності коробів весь обсяг зерна в шахті є зону сушіння, в якій відбувається безперервний процес випаровування вологи, що викликає зниження температури зерна. Отже, в шахтних сушарках температура зерна практично завжди нижче, ніж температура агента сушіння, що надходить, і тому його можна нагрівати сильніше, ніж у найпростіших камерних сушарках. Внаслідок цього з'являється можливість значно інтенсифікувати сушіння зерна без погіршення його якості. Залежно від виду зерна, його вологості, цільового призначення, температуру агента сушіння в шахтних сушарках підтримують на рівні 60-120 °С.

Дуже зручна в експлуатації та рекомендується для фермерських господарств пересувна шахтна зерносушарка К4-УС2-А продуктивністю 10 т/год, змонтована на шасі автомобільного причепа МАЗ-8925.

У шахтних сушарках складно сушити зерно вологістю вищою 25 % і особливо вищою 30 %. Ця зернова маса має погану сипкість і схильна до зависання між коробами. Це збільшує тривалість обробки, перегрів і навіть псування зерна, інколи ж загоряння легких органічних домішок. Для покращення проходження зерна через шахту його необхідно попередньо очистити від великих соломистих домішок та рослинних решток. Поліпшенню процесу сушіння сприяє також очищення зернової маси та від дрібних фракцій домішки, що закупорюють міжзернові простори.

Технологія сушіння зерна у барабанних зерносушарках.

У сільському господарстві широко використовуються для сушіння зерна стаціонарні барабанні сушарки СЗСБ-8 та СЗСБ-8А продуктивністю 8 т/год, а також пересувні барабанні сушарки СЗПБ-2,5 продуктивністю 2,5 т/год.

Хороші результати дає використання сушарок СБ-1,5, встановлених на струмах господарств у комплексі з агрегатом АВМ-1,5.

Сушильна камера барабанних зерносушарок виготовляється у вигляді циліндра (барабана), що обертається, що дозволяє успішно сушити засмічений, малосипучий матеріал (рис. 2.).

Сушильний барабан обладнаний підйомно-лопатевою системою. Лопаті барабана в процесі обертання захоплюють зерно та піднімають його вгору. Потім зерно вільно зсипається після досягнення ним кута схилу. Агент сушіння переміщається вздовж осі барабана та активно взаємодіє із зерном у процесі його пересипання. Завдяки хорошему контакту агента сушіння із зерном можна за більш короткий термін, ніж у шахтних сушарках, видалити 3-5 % вологи, використовуючи при цьому інтенсивніше нагрівання. Час перебування зерна у барабані 15-20 хвилин. Температура агента сушіння при сушінні зерна насінневого призначення повинна бути 100-110 °С, а при обробці продовольчого або фуражного зерна 180-250 °С.

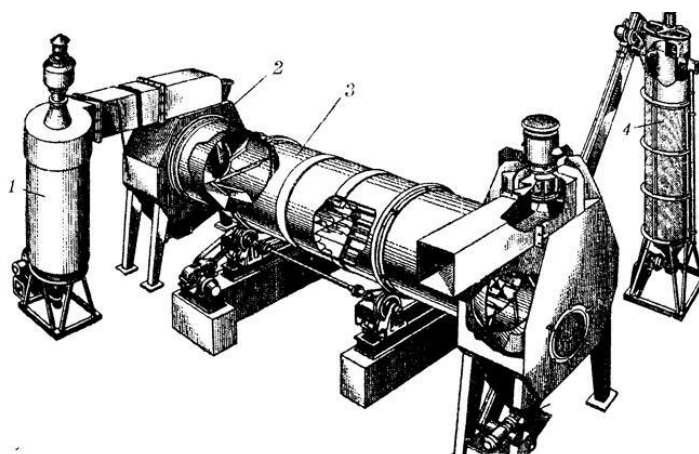


Рис. 1.2 Барабанна сушарка СЗСБ-8

1 – топка; 2 – завантажувальна камера; 3 - сушильний барабан; 4 – охолоджувальна колонка

У барабанній сушарці практично не регулюється тривалість сушіння. Час перебування зерна в барабані і швидкість його переміщення барабаном визначаються інтенсивністю потоку агента сушіння і механічним підпором шару зерна, що надходить в барабан. Це серйозна технологічна нестача

барабанних сушарок. Для повного висушування зерна підвищеної вологості його пропускають через сушарку кілька разів або послідовно використовують кілька сушарок. Так як зерно в барабані піддається підвищеним температурним і механічним впливам, ці сушарки не рекомендується використовувати для сушіння насіння, схильного до розтріскування (горох та інші бобові, кукурудза). Для сушіння насінневого зерна краще використовувати шахтні або камерні сушарки.

Ґрунтуючись на досвіді передових зарубіжних та вітчизняних фахівців у цій галузі та в результаті численних перевірок було доведено, що сушильна камера конвективного типу сушить більш ефективно та рівномірно. Сушильні камери цієї моделі характеризуються надійністю, економічністю та якістю. Базова система управління сушильної камери, що модернізується (див. рис. 1.1) є напівавтоматичною. Об'єм завантаження камери від 30 м^3 до 200 м^3 .

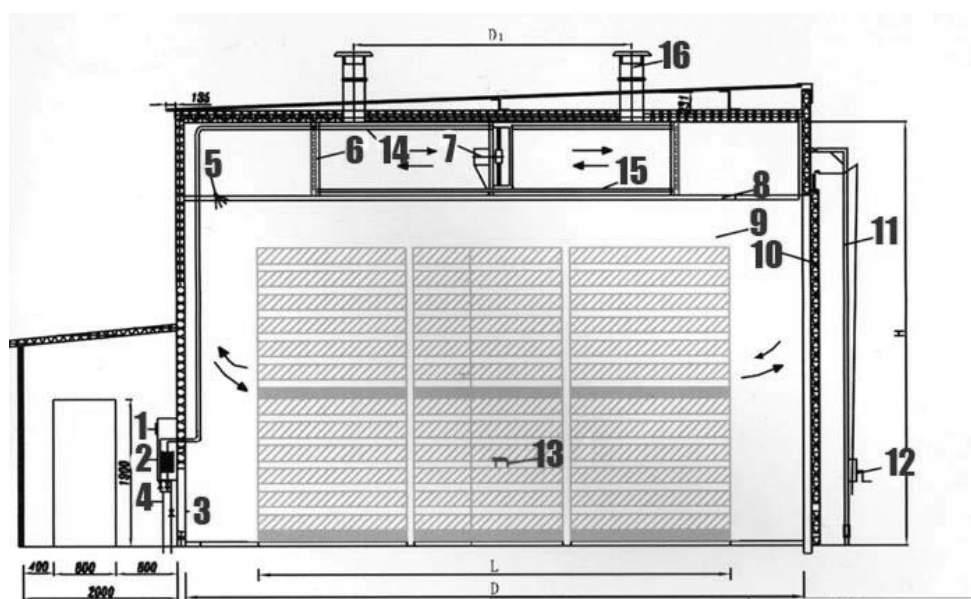


Рис. 1.3 Влаштування конвекційної сушильної камери зерна

У комплектацію сушильного обладнання входять такі системи: напівавтоматична система контролю теплового режиму та вологості атмосфери всередині сушильної камери, алюмінієвий корпус, підйомно-відкатні ворота з консоллю, контрольні дверцята, система вентиляції, система

опалення, трубопровід розпилювача, система видалення вологи, інвертер.

Принцип роботи сушильної камери типу конвективного. Під час сушіння повітря, що надходить з вентиляторів, проходить через калорифер (радіатор) 6 і, проникаючи в сушильну камеру, підвищує температуру, одночасно усуваючи вологість з поверхні зерна, потім виходить з протилежного боку з сушильної камери через вентилятори системи циркуляції повітря 7, утворюючи повітряний кругообіг. Коли рівень вологості перевищує норму, оператор сушки відповідно до показань датчиків вологи 1 подає керуючий сигнал на викид перенасиченого водою агента шляхом відкриття заслінки 16 і заміна його на сухий. Якщо вологість нижче норми, то подається сигнал на відкриття форсунок розпилювача вологи 5 таким чином здійснюється нагрівання і сушіння зерна. Крім цього, реверсивний оборот електродвигуна може періодично змінювати напрямок повітряного круговороту, що забезпечує рівномірне сушіння.

Фізичний процес сушіння зерна включає:

- вологообмін - випаровування вологи із зерна в довкілля;
- вологоперенесення - переміщення вологи всередині зерна.

Для сушіння необхідно, щоб відбувалися обидва процеси. Волога від внутрішніх, серцевих шарів повинна йти до поверхні (вологоперенесення) і видалятися з поверхні (вологообмін). При цьому важливо, щоб процеси вологообміну та вологоперенесення були б за інтенсивністю однаковими. Якщо кількість води, що видалається з поверхні, буде більшою, ніж у внутрішніх шарах, то й усихання поверхневих шарів буде більшим. В результаті буде створюватися напруга між внутрішніми та зовнішніми шарами. При цьому напруга буде тим більшою, чим більша різниця між вологістю серцевини та поверхні зерна. Напруги можуть призводити до деформацій у зерні і навіть до тріщин та руйнувань.

Такі відхилення викликані труднощами підтримки температурного режиму всередині камери в ручному режимі, а також недосконалістю засобів контролю вологості у внутрішніх, серцевих шарах зерна та атмосферного повітря в сушильній камері.

Безпосередній технологічний процес камерного сушіння включає підготовку штабеля сирого та зберігання висушеного матеріалу, проведення прогріву, кондиціювання та безпосередньо сушіння зерна.

У цілому нині камерна сушіння складається з низки технологічних і контрольних операцій, які виконують у певній послідовності.

До технологічних операцій процесу сушіння відносяться: початковий прогрів зерна, власне сушіння за певним режимом, кінцева (у ряді випадків проміжна) вологотеплообробка та кондиціювання.

Початковий прогрів зерна проводиться після завантаження камери матеріалом з метою швидкого прогрівання зерна в середовищі підвищеної температури та вологості, а також для попередження утворення внутрішніх напруг та збереження цілісності у початковий період сушіння. Для цього зерно піддається швидкому прогріву без випаровування з неї вологи в середовищі з підвищеною температурою і високою вологістю, для чого в камеру подають насичену пару при включених калориферах, вентиляторах, що працюють, і закритих припливно-витяжних патрубках.

Випаровування вологи із зерна має початися тільки після повного її прогріву по всій товщині. Тому всередині камери в період початкового прогріву мають бути створені умови, за яких волога не могла б випаровуватися з матеріалу.

Під час прогрівання в камері потрібно підтримувати постійну температуру приблизно на 5°C вище температури першого ступеня сушіння. На початку прогріву психрометрична різниця може бути значною, потім зменшують її до $(3...2)^{\circ}$.

Початок прогріву вважається з моменту, коли температура камери досягне необхідної температури зерна в кінці прогріву. Починаючи з цього моменту, зниження температури в камері або різке падіння вологості неприпустимо. Затягувати прогрів не слід, щоб уникнути «цвітіння» зерна.

Власне сушіння слідує за початковим прогріванням. Перехід на режим сушіння після прогрівання здійснюється поступово. Не рекомендується вживати термінових заходів для видалення надлишку вологи з камери, якщо

психрометрична різниця поступово збільшується і без відкриття повітрообмінних заслінок.

У камері встановлюють та підтримують задані режимом сушіння параметри сушильного агента (повітря).

Контроль за режимом сушіння та його регулювання ведуть за станом сушильного агента, що надходить у штабель. За станом сушильного агента у камері спостерігають періодично, а окремих випадках – безперервно. Покази записують у журнал щогодини.

Похибка підтримання температури не повинна перевищувати ± 2 °С від заданого режимом. При цьому похибка вимірювання та підтримки психрометричної різниці має бути не більше ± 1 °С.

Якщо температура, що регламентується режимом, не може бути досягнута з технічних причин, допускається проводити сушку при більш низькій температурі, але з обов'язковою підтримкою заданого ступеня насиченості сушильного агента.

Температура середовища під час кондиціювання підтримується на (5...8) °С вище температури на останньому ступені режиму сушіння, але не більше 100°С, а ступінь насиченості повинна відповідати (за діаграмою рівноважної вологості) середньої заданої кінцевої вологості, збільшеної на 1% .

Тривалість кондиціювання залежить від багатьох факторів і призначається відповідно до категорії якості сушіння, а також особливостями камери і продукту.

Показники якості сушіння підлягають нормуванню. Норми встановлюються залежно від категорії якості та умов сушіння.

Недотримання технології сушіння зерна може призвести до погіршення фізико-механічних властивостей, що проявляється у появі дефектів, і, як наслідок, зниження якості готового продукту та його рентабельності.

Розглянемо дефекти сушіння матеріалів та їх попередження. Зерно сушать з метою поліпшення якості та безпеки, тому будь-які відхилення від нормальних показників якості повинні розглядатися як результат незадовільного ведення сушильного процесу.

Причини появи дефектів сушіння та їх попередження:

Цвіль на матеріалі утворюється при застійній циркуляції повітря. Рекомендується посилити рух повітря, підвищити його температуру, застосувати вологотеплообробку.

Виникнення раковин у другій стадії через форсований процес у першій стадії. Необхідно проводити проміжну вологотеплообробку матеріалу по II стадії.

При використанні режимів високотемпературного процесу агентом сушіння служить перегріта пара при атмосферному тиску з температурою вище 100°C.

1.3 Технологія сушіння зерна у рециркуляційних зерносушарках

У цих сушарках зерно багаторазово проходить цикли нагріву, відволажування та проміжного охолодження, після чого частина рециркулюючого зерна остаточно охолоджують і направляють до складу. Одночасно з випуском просушеного та охолодженого зерна в сушарку надходить відповідна кількість сирого зерна, так що загальна маса зерна, що рециркулює, залишається постійною. Число циклів, які має пройти зерно, що просушується, залежить від необхідного загального зниження вологості, а також від зниження вологості за один цикл.

У рециркуляційній сушарці зерно в камеру нагрівання поступово поступає з бункера із завантажувальним пристроєм і падає у вигляді дощу в потоці агента сушіння, нагрітим до температури 250-350 оС. При цьому зерно контактує з таким гарячим агентом сушіння тільки протягом 2-3 сек. і тому нагрівається до температури не вище 55-60 оС. Потім нагріте зерно надходить у бункер для відволікання на 10-12 хвилин, де відбувається вирівнювання температури та часткове перерозподіл вологи між окремими зернами. Після охолодження, видалення частини висушеного зерна та додавання нових порцій сирого зерна повторюється нагрівання. Внаслідок хорошого перемішування зернової маси при рециркуляції зерно просушується

рівномірно, якість його зберігається, а вологість може бути знижена на 10-12% і більше. І що особливо важливо, не слід перед сушінням формувати партії зерна за вологістю, як у шахтних зерносушарках.

Режими сушіння зерна.

Під режимом сушіння слід розуміти рекомендовану температуру агента сушіння та гранично допустиму температуру нагрівання зерна та насіння. Також необхідно контролювати загальну тривалість сушіння та встановлювати кількість перепусток зерна через сушарку, або циклів сушіння.

Режим сушіння визначається:

- родом та видом зерна та насіння, або культурою;
- вихідною вологістю зерна та насіння;
- цільовим призначенням та якістю зерна та насіння;
- конструкцією та типом зерносушарки.

Головна складність сушіння зерна полягає в тому, щоб працювати при використанні гранично допустимих температур нагріву агента сушіння та нагріву зерна, забезпечити максимальну продуктивність сушарки при повному збереженні якості продукції. Перевищення встановлених температур нагріву агента сушіння та зерна веде до псування продукції, застосування надто м'якого режиму обробки знижує продуктивність сушарок.

Температурна стійкість зерна при сушінні визначається головним чином температурною стійкістю його білкових речовин. Перевищення допустимої температури нагріву зерна викликає коагуляцію білка, втрату життєвих функцій насіння та здатність їх до проростання, а у зерна пшениці – різке погіршення розтяжності білків ендосперму, зниження кількості та якості клейковини. Насіннєве зерно необхідно сушити при більш м'якому температурному режимі, тому що білки зародка менш стійкі до нагрівання і, крім того, зародок знаходиться безпосередньо під оболонкою, прогрівається і висихає насамперед. Тому норма виробітку при сушінні насіннєвого зерна в порівнянні з продовольчим знижується в 2 рази.

Насіння гороху, квасолі та інших культур має знижену питому поверхню випаровування, що викликає пересушування поверхневих шарів

насіння. При їх висушуванні відбувається ущільнення поверхневих шарів насіння, зменшення об'єму. Але так як зменшення обсягу спочатку відбувається лише в периферійних шарах насіння, а внутрішня частина залишається без зміни, це викликає великі фізичні напруги в насінні, і вони розтріскуються, спочатку тільки їх оболонка, а потім центральна частина. Тому насіння зернобобових культур сушать при м'якших температурних режимах, ніж насіння зернових культур. Нагрів насіння бобових культур не повинен перевищувати 30-35 °С. Відповідно знижується і продуктивність сушарок.

Для попередження розтріскування насіння, а також для проведення обробки в найбільш вигідних умовах постійної швидкості сушіння доводиться обмежувати разове знімання вологи у більшості типів сушарок в межах 4-6%. У наступний період відволікання в очікуванні повторного пропуску через сушарку в зерні відбувається перерозподіл та вирівнювання вологості між центральною та периферійними частинами.

Це забезпечує при повторній обробці сушіння зерна за досить високої швидкості вологовіддачі. Однак обмежений знімання вологи за один пропуск через сушарку різко ускладнює організацію процесу сушіння, змушує тимчасово зберігати недосушене зерно, що часто призводить до його псування. Це серйозний недолік сушарок шахтного та барабанного типу.

2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ СУШКИ

2.1 Характеристика газоповітряної суміші та стану зерна в процесі сушіння та охолодження

Газоповітряна суміш характеризується чотирма основними параметрами: температурою t_0 С ; відносною вологістю[?], %; вмістом води d , г/кг і ентальпією I , кДж/кг [3, 6, 7].

У процесі сушіння стан змінюється. Тому розрізняють нульовий (вихідний) стан - зовнішнє повітря перед входом в теплообмінник (в колорифер) з параметрами t_0 , ϕ_0 , d_0 , I_0 ; перший стан - нагріте в теплообміннику 1 повітря перед входом в сушильну камеру 2 з параметрами t_1 , ϕ_1 , d_1 , I_1 ; другий стан - відпрацьований агент сушіння на виході з сушильної камери з параметрами t_2 , ϕ_2 , d_2 і I_2 . Для охолодження зерна в охолоджувальну камеру 3 надходить зовнішнє повітря з параметрами t_3 , ϕ_3 , d_3 , I_3 .

Зерно як об'єкт сушіння характеризується трьома основними параметрами: витратою кг /н; температурою θ , 0 С та відносною вологістю ω ,%. Зерно при сушінні в камері нагрівається, а потім охолоджується в камері 3, причому з нього випаровується волога за рахунок теплоти акумулювання. Відповідно до цього розрізняють три стани зерна: перший - перед завантаженням в сушильну камеру з параметрами G_1 , θ_1 , ω_1 ; друге - після сушіння перед початком охолодження з параметрами G_2 , θ_2 , ω_2 , третє - після охолодження з параметрами G_3 , θ_3 , ω_3 .

Тепловий розрахунок сушіння зазвичай ведуть при сушінні пшениці на продовольчому режимі при зніманні води з 20 до 14%. Якщо задана початкова вологість зерна понад 20%, необхідно визначити кількість пропусків зерна через сушарку:

$$n = \frac{\omega_1 - \omega_k}{\Delta\omega_{дон}} \quad (2.1)$$

де ω_k - кондиційна вологість зерна ($\omega_k=14\%$ для зернових культур)

$\Delta\omega_{\text{доп}}$ - допустиме зниження вологості за один пропуск через прямоточну зерносушарку (для насіння хлібних культур - зернобобових та кукурудзи).

Розрахунок ведуть для кожної перепустки

$$n = \frac{20 - 14}{6} = 1$$

Фактичні витрати по сирому зерну для кожного проходу:

$$G_1 = G_n \cdot K_k / K_n \cdot K_c \quad (2.2)$$

де G_n - паспортна продуктивність зерносушарки, планових т/год;

K_n - коефіцієнт, що враховує початкову і кінцеву вологість культури, що висушується (беремо з довідкових таблиць [1, 5, 6];

K_c - коефіцієнт, що враховує режим сушіння (для насіння $K_c = 2$, для продовольчого зерна $K_c = 1$);

K_k - коефіцієнт, що враховує оброблювану культуру.

Приймаємо: $G_n = 5$; т/год; $K_c = 1$; $K_n = 1$; $K_k = 1$.

$$G_1 = 5 \cdot 1 / 1 \cdot 1 = 5 \text{ т / ч.}$$

2.2 Розрахунок випареної вологи в сушильній камері

Вихідним положенням розрахунку є передумова, що маса сухої речовини зерна і маса сухого повітря в процесі сушіння не змінюється і залишаються постійними величинами, внаслідок чого всі розрахунки відносяться до 1 кг сухої речовини і сухого повітря [4, 8]. Крім того, загальна кількість вологи, що бере участь у процесі, тобто вологи, що міститься в зерні та сушильному агенті (пар) - залишається постійною.

Розрахунок випареної вологи в сушильній камері, виходячи з матеріального балансу, ведуть за такою залежністю:

$$W = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} \quad (2.3)$$

Приймаємо $\omega_2 = 15\%$ [1]

$$W = 5 \frac{20 - 15}{100 - 15} = 0,294 m / ч = 294,1 кг / ч.$$

$$G_2 = G_1 \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} = 5 \frac{100 - 20}{100 - 15} = 4,705 m / ч = 4705 кг / ч.$$

Витрата зерна після охолоджувальної колонки визначається за такою формулою:

$$G_3 = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_3}, \quad (2.4)$$

де ω_3 – кінцева вологість зерна.

Приймаємо: $\omega_3 = 14\%$.

$$G_3 = 4705 \frac{20 - 14}{100 - 14} = 4651,2 кг / ч.$$

2.3 Визначення витрати повітря

На підставі сталості загальної кількості вологи, що бере участь у процесі сушіння, рівняння балансу вологи записується:

$$G_1 \frac{\omega_1}{100} + L \frac{d_1}{1000} = G_2 \frac{\omega_2}{100} + L \frac{d_2}{1000}, \quad (2.5)$$

де $G_1 \frac{\omega_1}{100}$ - волога, що надійшла із сирим зерном, кг/год;

$G_2 \frac{\omega_2}{100}$ - волога, що виноситься з просушеним зерном, кг/год;

L – витрата сухого повітря, кг/год;

$L \frac{d_1}{1000}$ - волога, що надійшла з агентом сушіння, кг/год;

$L \frac{d_2}{1000}$ - волога, що виноситься з відпрацьованим агентом сушіння,

кг/год.

Після перетворення рівняння (4) з урахуванням (3) годинна витрата повітря на випаровування вологи визначається:

$$L = \frac{1000W}{d_2 - d_1} \quad (2.5)$$

Питома витрата сухого повітря:

$$\ell = \frac{L}{W} = \frac{1000}{d_2 - d_1} \quad (2.6)$$

2.4 Визначення витрати теплоти на сушіння

Баланс теплоти, що виражає рівність між приходом та витратою теплоти в сушильній камері при аналітичних розрахунках зводиться до роздільного визначення всіх статей приходу та витрати теплоти.

2.4.1 Надходження теплоти

Теплота, що вноситься в сушильну камеру з атмосферним повітрям:

$$Q_0 = L \cdot I_0, \quad (2.7)$$

де I_0 - ентальпія зовнішнього повітря, кДж/кг.

Теплота, отримана в нагрівальному пристрої:

$$Q_H = L(I_1 - I_0) \quad (2.8)$$

Теплота, що надійшла в камеру із зерном:

$$Q_3 = G_1 \cdot C_1 \cdot \theta_1 = G_2 \cdot C_2 \cdot \theta_1 + WC_{вл} \cdot \theta_1 \quad (2.9)$$

C_1 – питома теплоємність сирого зерна;

$$C_1 = \frac{\omega_1}{100} \cdot C_{вл} + \frac{100 - \omega_1}{100} \cdot C_c \quad (2.10)$$

C_c - теплоємність сухої речовини зерна, що дорівнює 1,54 кДж/кг/год;

$C_{вл}$ - питома теплоємність води, що дорівнює 4,19 кДж/кг•год.

У самій сушильній камері може бути джерело, що містить додаткову теплоту Q доп.

$$C_1 = \frac{20}{100} \cdot 4,19 + \frac{100-20}{100} \cdot 1,54 = 2,07 \text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{ч};$$

Тоді $Q_3 = 5000 \cdot 2,07 \cdot 5 = 51750 \text{кДж} / \text{ч}$

2.4.2 Витрата теплоти

Витрата теплоти, що виносить із сушарки разом із зерном:

$$C_2 = \frac{\omega_2}{100} \cdot C_{\text{вл}} + \frac{100-\omega_2}{100} \cdot C_c$$

$$C_2 = \frac{15}{100} \cdot 4,19 + \frac{100-15}{100} \cdot 1,54 = 1,9375 \text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{ч}$$

$$Q_n = 1,9375 \cdot 4705 \cdot 40 = 365108 \text{кДж} / \text{ч}$$

Питома витрата теплоти:

$$q_n = \frac{Q_n}{W} = \frac{365108}{294,1} = 1241,44 \text{кДж} / \text{кг}$$

Втрати теплоти в довкілля через стінки сушарки:

$$Q_{nc} = K_0 \cdot F(t_{cp} - t_s), \quad (2.12)$$

де k_0 - загальний коефіцієнт теплопередачі від агента сушіння в навколишнє середовище через стінки камери сушальної $\text{кДж} / \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$;

F - площа всіх стінок сушальної камери, через які відбувається витік теплоти у навколишнє середовище;

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

де t_{cp} - середня температура агента сушіння,

t_s - температура повітря у приміщенні сушарки, °C

Розмір коефіцієнта тепловіддачі [4]:

$$K_0 = \frac{1}{1/\alpha_1 + \sum \delta / \lambda + 1/\alpha_2} \quad (2.13)$$

де α_1 - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до навколишнього повітря;

α_2 – коефіцієнт теплопровідності, кДж/м²•ч•0С;

λ - коефіцієнт тепловіддачі від газів чи повітря до внутрішньої стінки, кДж/м²•ч•0С;

δ - товщина стінки та шару ізоляції, м.

Приймаємо $\alpha_1 = \alpha_2 = C + \rho \cdot v$

$\alpha_1 = 5,58 + 3,95 \cdot 5 = 25,33 \text{ Вт/м}^2 \cdot 0\text{С}$ [8];

$\alpha_2 = 5,81 + 3,95 \cdot 5 = 25,56 \text{ Вт/м}^2 \cdot 0\text{С}$ [8];

Приймаємо сталі = 46 Вт/м² • 0С [8]; лізоляції = 0,13 Вт/м² • 0С [8];

Приймаємо сталі = 2 мм, ізоляції = 8 мм.

$$K_0 = \frac{1}{1/25,33 + 0,002/46 + 0,008/0,13 + 1/25,56} =$$

$$= 7,13 \text{ Вт/м}^2 \cdot 0\text{С} = 25,67 \text{ кДж/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot 0\text{С}$$

Приймаємо: $F = 13 \text{ м}^2$. з прототипу.

$$t_{cp} = \frac{70 + 30}{2} = 50^0 \text{ С}$$

$$Q_{nc} = 25,67 \cdot 13(50 - 5) = 15016,95 \text{ кДж/ч.}$$

Втрати теплоти з теплоносієм, що відпрацював:

$$Q_{отр} = L \cdot I_2 \quad (2.14)$$

Питомі втрати теплоти

$$q_{nc} = \frac{Q_{nc}}{W} = \frac{15016,95}{294,1} = 51,06 \text{ кДж/кг}$$

2.4.3 Тепловий баланс

У загальному вигляді тепловий баланс виразиться рівнянням:

$$Q_0 + Q_n + Q_3 + Q_{дон} = Q_n + Q_{nc} + Q_{отр} \quad (2.15)$$

або у розгорнутому вигляді:

$$L I_0 + L(I_1 - I_0) + C_e \cdot W \cdot \theta_1 + G_2 \cdot C_2 \cdot \theta_1 + Q_{дон} = C_2 \cdot G_2 \cdot \theta_2 + k_0 \cdot F(t_{cp} - t_e) + L \cdot I_2$$

Повна годинна витрата на сушіння складе:

$$Q = L(I_1 - I_0) = L(I_2 - I_0) - C_e \cdot W \cdot \theta_1 + C_2 \cdot G_2 (\theta_2 - \theta) + k_0 \cdot F(t_{cp} - t_e) - Q_{дон} \quad (2.16)$$

Розділивши обидві частини рівняння (16) на W отримаємо питому витрату теплоти

$$q = \ell(I_2 - I_0) - C_e \cdot \theta_1 + q_m + q_{nc} + q_{дон} \quad (2.17)$$

Рівняння (17) можна записати у вигляді:

$$q = \ell(I_2 - I_0) - \Delta \quad (2.18)$$

де? - Різниця між додаванням і втратою в сушильній камері, віднесена на 1 кг ісп. вологи.

$$\Delta = C_e \cdot \theta_1 + q_{дон} - q_m - q_{nc} \quad (2.19)$$

$$\Delta = 4,19 \cdot 5 + 0 - 1241,44 - 51,06 = -1271,55 \text{кДж} / \text{кг исп.влаг}$$

3. ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

3.1 Побудова процесу сушіння на I - d -діаграмі

Для визначення величин питомої витрати в газоповітряної суміші і теплоти q графічним способом спочатку підраховується величина втрат теплоти за рівнянням (19), а потім по I - d -діаграмі знаходяться цікаві для нас величини [1, 4].

Суть графічної частини теплового розрахунку за допомогою I - d -діаграми зводиться до відшукування на ній положення трьох точок А, В і С, що відповідають трьом станам газоповітряної суміші та визначення за цими точками параметрів t , ϕ , d , I для цих станів.

Нульовий стан - зовнішнє повітря з температурою $t_0=50\text{C}$ та вологістю $\phi_0=60\%$ перед входом у нагрівач. Відповідно до цих параметрів знаходять точку А на I - d -діаграмі, відповідно до вихідних даних, на перетині ізотерми t_0 і лінії постійної відносної вологості ϕ_0 . Отримали $d_0 = 3,45$ г/кг, $I_0 = 13$ кДж/кг.

Перший стан - нагріте повітря, що пройшло через нагрівач перед входом в сушильну камеру характеризується положенням точки В. Для процесу сушіння нагрітим повітрям, коли $d_1 = d_0 = 3,45$ г/кг положення точки знаходиться на перетині вертикальної лінії $d_0 = \text{const}$ проведеної з точки А до перетину з ізотермою $t_1 = \text{const}$.

Температура сушильного агента t_1 залежить від призначення зерна (на насінневі або продовольчі цілі), його вологості та типу зерносушарки. Тому її приймають граничною з використанням рекомендацій [5, 15] та інструкцій з експлуатації подібних сушарок $t_1 = 700\text{C}$. Отримали $I_1 = 80$ кДж/кг, $\phi_1 = 0\%$.

Лінія АВ відображає процес нагрівання повітря в теплообміннику (калорифері), при якому вміст вологи не змінюється.

Третій стан - відпрацьоване повітря на виході з сушарки характеризується точкою, положення якої на $I - d$ -діаграмі знаходять у наступному порядку:

а) На лінії $I_1 = \text{const} = 80$ кДж/кг намічають довільну точку e ;

б) Від обраної точки e відкладають відрізок $e\varphi$ по горизонталі до перетину з лінією $d_0 = \text{const} = 3,45$ г/кг і вимірюють відрізок мм;

в) Визначають величину відрізка eE (з урахуванням масштабів $I - d$ - діаграми) за рівнянням:

$$eE = e\varphi \frac{\Delta M d}{1000 M i} \quad (3.1)$$

де $M i$ - масштаб шкали ентальпії, кДж / кг сух. в 1 мм;

$M d$ - масштаб шкали вмісту вологи, г/кг в 1мм;

φ - різниця між додаванням та втратами тепла в сушильній камері, що визначається за рівнянням (19);

$M i = 0,75$ кДж/кг мм; $M d = 0,36$ г/кг • мм; $e\varphi = 30$ мм.

$$eE = 18 \frac{1271,55 \cdot 0,36}{1000 \cdot 0,75} = 11 \text{ мм}$$

г) Знайдений відрізок eE відкладають від точки e вниз по вертикалі, якщо φ - негативна величина та відзначають положення проміжної точки E ;

д) Знайдену раніше точку з'єднують з проміжною точкою E прямою лінією і продовжують її до перетину з точкою C (лінія $\varphi_2 = \text{const} = 85\%$ або ізотерму $t_2 = \text{const}$).

Отримана лінія BC характеризує процес сушіння працюючої на підігрітому повітрі.

Отримаємо $d_2 = 16$ г/ кг , $t_2 = 250$ С $I_2 = 66,75$ кДж/кг.

Підвищення вмісту вологи від d_0 до d_2 характеризується горизонтальною прямою CD , проведеної зі знайденої точки C до перетину в точці D з лінією $d_0 = \text{const}$.

дійсній сушарці зображується по $I - d$ -діаграмі відрізками AB і CD . Вимірявши довжини цих відрізків у мм визначають питому витрату агента сушіння:

$$\ell = \frac{1000}{CD \cdot Md} \quad (3.2)$$

$$\ell = \frac{1000}{35 \cdot 0,36} = 79,36 \text{ кг} / \text{кг исп. влаги}$$

та питома витрата теплоти:

$$q = \frac{M_i \cdot AB}{M_d \cdot CD} \cdot 1000, \quad (3.3)$$

$$q = \frac{0,75 \cdot 90}{0,36 \cdot 35} \cdot 1000 = 5,35714 \cdot 1000 = 5357,14 \text{ кДж} / \text{кг}$$

Для завершення теплового розрахунку визначають годинну витрату агента сушіння:

$$L = \ell \cdot W, \quad (3.4)$$

$$L = 79,35 \cdot 294,1 = 23336,8 \text{ кг} / \text{ч}$$

Перевіряє тепловий баланс.

$$LI_0 + L(I_1 - I_0) + C_e \cdot W \cdot \theta_1 + G_2 \cdot C_2 \cdot \theta_1 + Q_{дон} = C_2 \cdot G_2 \cdot \theta_2 + k_0 \cdot F(t_{cp} - t_e) + L \cdot I_2$$

$$23336,8 \cdot 13 + 23336,8(80 - 13) + 4,19 \cdot 294,1 \cdot 5 + 4705 \cdot 1,9375 \cdot 5 =$$

$$= 1,9375 \cdot 4705 \cdot 40 + 25,67(50 - 5) \cdot 13 + 23336,8 \cdot 66,75$$

$$1918685,5? 1937385,8$$

Помилка балансу $0,97\% < 5\%$

З урахуванням вологості та температури відпрацьованого агента сушіння та годинна витрата агента сушіння визначають:

$$V = \ell \cdot W \cdot \vartheta_0 \quad (3.5)$$

де ϑ_0 – обсяг вологого газу на 1 кг сухого повітря, м³/кг

Приймаємо: $\vartheta_0 = 1,136$, м³/кг[2].

$$V = 79,36 \cdot 294,1 \cdot 1,136 = 26513,98 \text{ м}^3 / \text{ч}$$

Годинна витрата теплоти:

$$Q = q \cdot W \quad (3.6)$$

$$Q = 5357,14 \cdot 294,1 = 1575534,87 \text{ кДж} / \text{ч}$$

Годинна витрата умовного палива становитиме:

$$B_y = \frac{Q}{Q_n^p \cdot \eta_T} \quad (3.7)$$

де Q - годинна витрата палива;

η_T - ККД топки, що дорівнює 0,85 ... 0,95;

Q_n^p - теплотворна здатність умовного палива, що дорівнює 29330 кДж/кг.

$$B_y = \frac{1575534,87}{29330 \cdot 0,9} = 59,68 \text{ кг} / \text{ч}$$

Питомі витрати умовного повітря:

$$v_y = \frac{B_y}{G} \quad (3.8)$$

$$v_y = \frac{59,68}{5} = 7,4 \text{ кг} / \text{пл} \cdot \text{т}$$

Термічний ККД сушарки визначається за формулою [7]:

$$\eta = \frac{I\omega_2 - I\omega_1}{q} \cdot 100 \quad (3.9)$$

де $I\omega_1$ – ентальпія води, що міститься у вихідному матеріалі на вході в сушарку, кДж/кг

$$I\omega_1 = C_w \cdot \theta \quad (3.10)$$

де C_w – теплоємність води; $I\omega_2$ – ентальпія водяної пари у відпрацьованому агенті сушіння;

$$I\omega_2 = Q\omega_0 + C_p \omega_2 t_2 \quad (3.11)$$

де $Q\omega_0$ – теплота випаровування води при 00С ($Q\omega_0 = 2500$ кДж/кг);

$C_p \omega_2$ – теплоємність водяної пари ($C_p \omega_2 = 2$ кДж/кг 0С).

$$I\omega_1 = 4,19 \cdot 5 = 20,95 \text{ кДж/кг.}$$

$$I\omega_2 = 2500 + 2 \cdot 30 = 2560 \text{ кДж/кг}$$

$$\eta = \frac{2560 - 20,95}{5357,14} \cdot 100 = 47,39\%$$

3.2. Розрахунок процесу охолодження зерна

Охолодження висушеного зерна провадиться піддувкою через нього зовнішнього повітря. При цьому воно додатково просушується, знижуючи вологість від 2 до 3 .

Розрахунок охолоджувальної камери також ґрунтується на балансі зерна, вологи, повітря та теплоти [1, 4].

Витрата зерна після охолоджувальної колонки визначається за такою формулою:

$$G_3 = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_3}, \quad (3.12)$$

де ω_3 – кінцева вологість зерна.

Приймаємо: $\omega_3 = 14\%$.

$$G_3 = 4705 \frac{20 - 14}{100 - 14} = 4651,2 \text{ кг / ч.}$$

Волога, випарована в процесі охолодження:

$$W_0 = G_2 - G_3 = G_2 \frac{\omega_2 - \omega_3}{100 - \omega_3} \quad (3.13)$$

$$W_0 = 4705 \frac{15 - 14}{100 - 14} = 54,7 \text{ кг / ч}$$

Надалі для розрахунку процесу охолодження зручно користуватися I - d -діаграмою.

З точки А проводять лінії $I \theta = \text{const}$, $d \theta = \text{const}$. Нижче точки А в утворених цими лініями кут вписують довільний горизонтальний відрізок $e'\phi'$. З точки e' , що лежить на лінії $I \theta$ проводять вертикаль, на якій відкладають відрізок $e'E'$, рівний за величиною

Значення їх визначають як

$$e'E' = e'\phi' \frac{\Delta_{ox} M_d}{1000 M_i}$$

$$\Delta_{ox} = q_{ox} + C_B \theta_2 - q_{nom} \quad (3.14)$$

де q піт - втрати теплоти в охолоджувачі, зазвичай за величиною вони не значні 120...3 кДж/кг вик. вологи. У розрахунках можна прийняти q піт = 0;

$C_B \theta_2$ - теплота від вологи зерна випаровується в охолоджувальній камері.

Q_{ox} – питомі втрати теплоти зерна в охолоджувальній камері.

q_{ox} – питомі втрати теплоти зерном в охолоджувальній камері.

$$q_{ox} = \frac{G_3}{W_{ox}} C_3 (\theta_2 - \theta_3) \quad (3.15)$$

де C_3 - теплоємність зерна при вологості 3 ;

$$C_3 = \frac{\omega_3}{100} \cdot C_e + \frac{100 - \omega_3}{100} \cdot C_c \quad (3.16)$$

$$C_3 = \frac{14}{100} \cdot 4,19 + \frac{100 - 14}{100} \cdot 1,54 = 1,911 \text{ кДж/}^\circ\text{C}$$

$$q_{ox} = \frac{4651,2}{54,7} \cdot 1,911 (40 - 20) = 3251,8 \text{ кДж/кг}$$

$$e' E' = 22 \frac{(3251,8 + 4,19 \cdot 40) \cdot 0,36}{1000 \cdot 0,75} = 36,1 \text{ мм}$$

Знайдену на діаграмі точку E з'єднують з точкою A і отриману пряму AE продовжують до перетину з ізотермою $E3 = \text{const}$ (або на цій лінії) відзначають точку C'.

Для визначення питомої витрати сухого повітря для охолодження знаходять величину різниці $d_3 - d_0$ рівну відрізка C'D', тоді

$$\ell_{ox} = \frac{1000}{30 \cdot 0,36} = 92,4 \text{ кг/кг исп.вл.}$$

Годинна витрата сухого повітря на охолодження:

$$L_{ox} = \ell_{ox} \cdot W_{ox} \quad (3.17)$$

$$L_{ox} = 92,4 \cdot 54,7 = 5054,28 \text{ кг/ч}$$

Годинна витрата вологого повітря визначається:

$$V_{ox} = \ell_{ox} \cdot W_{ox} \cdot v_0' \quad (3.18)$$

де v_0' – обсяг вологого газу на 1 кг сухого повітря, м³/кг;

Відповідно до [1] приймаємо $v_0' = 0,809$ м³/кг.

$$V_{ox} = 92,4 \cdot 54,7 \cdot 0,809 = 4088,9 \text{ м}^3 / \text{ч}$$

В результаті розрахунків, кількість вологи, випарованої в сушильній та охолоджувальній камерах:

$$W_{\text{сум}} = W + W_{ox} \quad (3.19)$$

$$W_{\text{сум}} = 294,1 + 54,7 = 348,8 \text{ кг} / \text{ч}$$

Сумарні втрати теплоти зерном знаходимо за такою формулою:

$$q_{\Sigma} = \frac{Q}{W_{\text{сум}}} = \frac{1575534,87}{348,8} = 4517,1 \text{ кДж} / \text{кг}$$

3.3 Підбір вентилятора для зерносушарки

Залежно від опору мережі та конструкції сушарок застосовують стандартні вентилятори.

Опір зернового шару обчислюють за такою формулою:

$$P_{\text{сл.}} = 9,81 \cdot A \cdot t_g \cdot v^n \quad (3.20)$$

де t - товщина шару в мм, рівна кроку коробів по вертикалі;

- умовна швидкість повітря, віднесена до незаповненого перерізу, м/с;

A і n – коефіцієнти, що залежать від фізичних властивостей зерна

Приймаємо: $A = 1,41$ [1], $n = 1,43$ [1], $t = 0,4$ м [2], $v = 5$ м / с [1].

$$P_{\text{сл.}} = 9,81 \cdot 1,41 \cdot 0,4 \cdot 5^{1,43} = 55,25 \text{ м}^2 / \text{с}$$

Отриманий повний опір P перераховують для нормальних умов ($t_0 = 200$ С , $\rho = 1,2$ кг/м³, $p = 101,3$ кПа), для яких дано характеристики вентиляторів.

$$P_{\text{н.у.}} = P \frac{293}{t_B + 273} \cdot \frac{101,3}{B_p} \quad (3.21)$$

$$P_{н.у.} = 55,26 \frac{293}{5 + 273} \cdot \frac{101,3}{99,3} = 59,41 \text{ м}^2 / \text{с}$$

де t - температура повітря або газу перед входом у вентилятор, 0С;

P_r – барометричний тиск, кПа.

Потужність електродвигуна вентилятора:

$$N_{\text{э}} = \frac{10^{-3} P_{н.у.} \cdot k \cdot V}{\eta \cdot \eta_n} \quad (3.22)$$

де V – продуктивність вентилятора;

k - Коефіцієнт запасу потужності на пусковий момент, приймаємо $k = 1,1$;

η - ККД вентилятора, який визначається за його характеристикою;

η_n – ККД приводу з урахуванням втрат у підшипниках, приймаємо $\eta_n = 0,98$.

$$N_{\text{э}} = \frac{10^{-3} 59,41 \cdot 1,1 \cdot 10,56}{0,8 \cdot 0,98} = 0,88 \text{ кВт}$$

Питомі витрати електроенергії визначають за такою формулою:

$$n_{\text{э}} = \frac{\sum N_{\text{э}i}}{G_n} \quad (3.23)$$

де $N_{\text{э}i}$ - Сумарна потужність електродвигуна вентиляторів.

$$n_{\text{э}} = \frac{0,88}{5} = 0,176 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$$

Витрата повітря, який повинен бути розрахований топковий блок визначається за співвідношенням (24).

Максимальна теплопродуктивність визначається за такою формулою:

$$Q_{\text{ен}} = \frac{C_v \cdot V \cdot \rho_v (t_1 - t_0)}{\eta} \quad (3.24)$$

де C_v – теплоємність повітря, кДж/кг 0С, $C_v = 0,71$ кДж/кг 0С;

ρ_v – щільність повітря, кг/м³, $\rho_v = 1,2$ кг/м³;

t_1 – максимальна температура сушильного агента на продовольчому режимі, 0С;

t_0 – температура зовнішнього повітря, 0C , $t_0 = 50\text{C}$;

η – ККД теплообмінника, $\eta = 0,7$.

$$Q_{\text{вп}} = \frac{0,71 \cdot 26513,98 \cdot 1,2(70 - 5)}{0,7} = 2097634,59 \text{кДж/ч}$$

$$Q = 1575534,7 \text{кДж/год}$$

$$Q_{\text{вп}} > Q$$

За отриманим значенням $Q_{\text{вп}}$ вибираємо топковий блок, найбільш близький за продуктивністю. Вибираємо топковий блок.

Об'єм барабана визначаємо за формулою:

$$V_{\text{б}} = G_{\text{п}} \cdot \tau_{\text{б}} / v_{\text{м}} \cdot \eta \cdot 60, \quad (3.25)$$

де $G_{\text{п}}$ - паспортна продуктивність сушарки, кг/год;

$\tau_{\text{б}}$ - зпозиція сушарки, хв ($\tau_{\text{б}} = 300$ хв);

$v_{\text{м}}$ – насипна щільність зерна, кг/м³;

η – коефіцієнт заповнення бункера ($\eta=1$).

$$V_{\text{б}} = 5000 \cdot 300 / 1 \cdot 60 \cdot = \text{м}^3.$$

Діаметр зовнішнього корпусу приймаємо за прототипом (БВ-40)
 $D=3085\text{мм}$.

Висота сушильної камери:

$$H = 4 \cdot V_{\text{б}} / \pi \cdot (D^2 - d^2), \quad (3.26)$$

де d – діаметр центральної труби, мм.

4. ПОКАЗНИКИ КЛЮЧОВИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ

4.1 Обґрунтування режимів роботи зерносушарок та контроль за сушінням

Теплове сушіння зерна та насіння в зерносушарках – основний та найбільш високопродуктивний спосіб. Щоб найбільш раціонально організувати сушіння зерна та насіння, необхідно знати та враховувати такі основні положення.

Гранично допустима температура нагріву (до якої температури слід нагрівати цю партію зерна чи насіння). Перегрів завжди призводить до погіршення або навіть повної втрати технологічних та посівних якостей. Недостатнє нагрівання зменшує ефективність сушіння і здорожчає її, оскільки за меншої температури нагрівання менше видаляється вологи. Гранично допустима температура нагрівання залежить від культури, характеру їхнього використання, вихідної вологості.

Оптимальна температура агента сушіння, що вводиться в камеру зерносушарки. При зниженій температурі агента сушіння в порівнянні з рекомендованою зерно не нагрівається до потрібної температури або для цього збільшують термін його перебування в сушильній камері, що знижує продуктивність зерносушарок. Температура агента сушіння вище рекомендованої неприпустима, оскільки викликає перегрів зерна.

Шахтні сушарки. Пристрій робочої камери представлений металевою бункер-шахтою. Усередині її розміщені металеві коробки, їх призначення – зробити зернову масу доступнішою агенту сушіння та рівномірно газопроникною. Агент сушіння надходить у шахту через дифузор, проходить через зернову масу, нагріває та підсушує її.

Режими сушіння фуражного зерна в залежності від вологості показані в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Режими сушіння фуражного зерна в залежності від вологості

Культура, сорт	Вологість, %		Перепустки через зерносушарку		Барабанна сушарка	
	вихідна	кінцева	всього	номер пропуску	Температура, °С	
					агента сушіння	нагріву насіння
Фуражне						
Озиме жито	16	13	1	1	110-115	45
Ячмінь	17	13	1	1	110-115	43
Овес	19	14	1	1	110-115	40
Ярова пшениця	17	13	1	1	110-115	45

За даними таблиці можна дійти невтїшного висновку у тому, що температура агента сушіння повинна бути такою, щоб забезпечити підтримку заданої температури нагріву зерна відповідно до їх вологості, цільового призначення та вихідної якості

Для всіх культур кількість перепусток через зерносушарку дорівнює 1.

Режими сушіння в камерних сушарках показані у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Режими сушіння в камерних сушарках

Культура	Відносна вологість повітря, %	Температура нагрівання		Продуктивність сушіння, ч	Вологість зерна, %	
		повітря	насіння		До сушіння	Після сушіння
Озиме жито	65-75	60	50-55	24-48	16	13
Ярова пшениця	65-75	60	50-55	24-48	17	13
Ячмінь	65-75	60	50-55	24-48	17	12
Овес	65-75	60	50-55	24-48	19	14

За даними таблиці можна дійти невтїшного висновку у тому, що температура нагрівання насіння в камерних сушарках для сушіння зерна на фураж становить 50-55 °С.

4.2 Активне вентилявання зерна

Активним вентиляванням називають примусове продування зерна повітрям без його переміщення, що можливо внаслідок свердловини зернової маси. Повітря, що нагнітається вентиляторами, вводиться в зернову масу через систему каналів або труб і пронизує її в різних напрямках. Холодним повітрям можна за кілька годин охолодити всю зернову масу і цим її консервувати.

Періодична зміна повітря в партіях насінневого зерна сприяє збереженню його схожості, а продування свіжоприбраного зерна сухим теплим повітрям – його дозрівання після прибирання. Застосовуючи активне вентилявання, забезпечують передпосівне обігрів насіння. Активне вентилявання виключає травмування зерна, що завжди тією чи іншою мірою відбувається під час пропуску зернових мас через зерносушарки, зерноочисні машини та при переміщенні транспортними механізмами.

Активне вентилявання унеможливорює витрати на переміщення зернової маси і значно скорочує потребу в робочій силі.

Активне вентилявання підігрітим повітрям значно підсушує зернову масу без переміщення у сховищі чи майданчиках.

Успіх активного вентилявання, як і будь-якого технологічного прийому, залежить не тільки від конструкції установки та правильності її експлуатації. На ефективність вентилявання впливають температура, і вологонасиченість використовуваного повітря, вологість зернової маси та її температура. Найважливішу роль відіграють загальна кількість повітря, що нагнітається в зернову масу, та його обсяг за певний час (1 год).

Технологічної ефективності вентилявання досягають тим швидше, чим більша різниця між параметрами повітря та зерновою масою.

Сушіння активним вентиляванням створює умови для післязбирального дозрівання насіння, виключає перегрів, оскільки не застосовують агент сушіння високої температури. Однак при даному способі насіння нерівномірно обігривається і дещо нерівномірно висушується по шарах насипу. Низька температура виключає шкідливі дії, а перемішування зернової маси під час її транспортування після сушіння значно вирівнює і

вологість. Сушіння закінчують, коли вологість верхнього шару насипу знижується до 16..17%.

Режими охолодження зерна на установках активного вентиляювання показані у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 Режими охолодження зерна на установках активного вентиляювання

Встановлення активного вентиляювання				культура	Маса зерна на установці, т	Вологість зерна, %	Висота насипу, м	Питома подача повітря, м ³ /т на годину	Тривалість охолодження, год
Тип	Вентилятор		Площа, м ²						
	марка	Продуктивність, м ³ / год							
СВУ-1	СРМ-5	11000	60	Оз.жито	157,1	16	2,7	70	28,6
				Ячмінь	100	17	2,6	110	18,2
				Овес	100	19	2,5	110	18,2
				Яр.пшениця	157,1	17	2,6	70	28,6

З таблиці 8 видно, що на установці СВУ-1, тривалість охолодження становить для озимого жита 28,6 год, ячменю – 18,2 год, для вівса-18,2, ярої пшениці – 28,67 год залежно від питомої подачі повітря та площі встановлення активного вентиляювання.

4.3 Кількісно-якісний облік зерна під час післязбирального підробітку

У процесі післязбиральної обробки зерна відбувається зменшення маси за рахунок зниження вологості при сушінні та активному вентиляюванні та зниження Технологічні операції післязбирального підробітку зернового вороху та розрахунок виходу зерна після підробітку вмісту домішок, щуплого та дрібного зерна показані в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 Технологічні операції післязбирального підробітку зернового вороху та розрахунок виходу зерна після підробітку

№	Операція	Агрегат, машина	Маса до подробики, т	Вологість, %		Зменшенн я маси (X1), %	Вміст домішок, %		Зменшенн я маси (X2), %	Вихід зерна (маса після підробітку), т
				до	післ я		д о	післ я		
Озиме жито	Предв. очищенн я	ОВС-25	350,3	16	15	1,2	10	7	3,2	334,9
	Сушіння	СКУ-10	334,9	15	14	1,2	7	6	1,1	327,2
	Первич. очищенн я	СМ-4	327,2	14	13	1,1	6	2	4	310,5
Ячмінь	Предв. очищенн я	ОВС-25	1478	17	15	2,3	10	7	3,4	1408,5
	Сушіння	СКУ-10	1408,5	15	13	2,3	7	6	1,1	1360,6
	Первич. очищенн я	СМ-4	1306,6	13	12	1,1	6	2	4	1291,2
Яр. пшениця	Предв. очищенн я	ОВС-25	895	17	16	1,1	10	6	4,1	848,5
	Сушіння	СКУ-10	848,5	16	14	2,3	6	5	1	820,5
	Пер.	СМ-4	820,5	14	13	1,1	5	2	3	786,9
Овес	Предв. очищенн я	ОВС-25	315	19	18	1,2	10	7	3,2	301,1
	Сушіння	СКУ-10	301,1	18	14	4,7	7	6	1	283,9
	Пер.	СМ-4	283,9	14	13	1,1	6	2	4	269,4

За даними таблиці 4.4 можна сказати, що середня вологість зернових культур становить 17 %. Розрахунок виходу зерна після підробітку, з таблиці 9, озимого жита становить 310,5 т, ячменю – 1291,2 т, ярої пшениці – 786,9 т. вівса – 269,4 т. Усі культури пропускаємо через сушарку один раз.

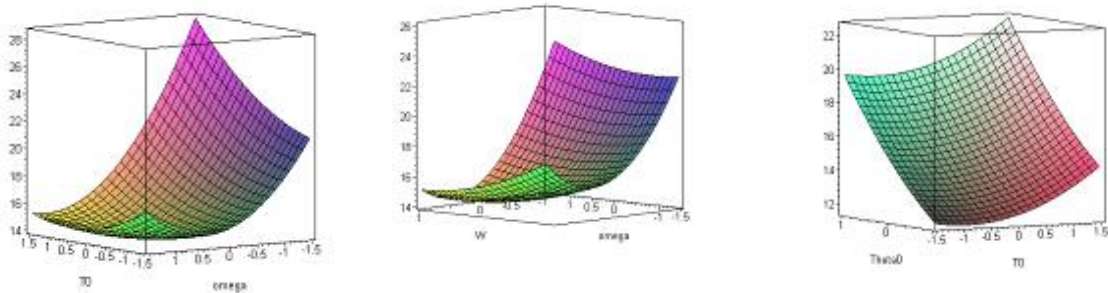
4.4 Аналіз режимних параметрів оптимального процесу сушіння

Аналіз режимних параметрів оптимального процесу сушіння в першій зоні показує, що одночасна їх зміна: збільшення T_0 , V , D_0 сприяє швидкому нагріванню зерна у вигляді рідини (її вміст в зерні залежить від початкової

вологості), а також до деякого (які залежить від $V_H - V^{onm}$) збільшення ступеня перемішування зерна.

Отже, одночасна зміна цих параметрів не призводить до небажаних явищ, які мали б місце при такій зміні кожного з них окремо (тобто перегрівання, зволоження, недосушування або пересушування).

Деякі реалізації процесів у вигляді тривимірних поверхонь відгуку на фактори, що діють (початкова температура зерна і сушильного агента, початкова вологість зерна, частота коливань робочого органу випускного апарату) наведені на малюнках 12, 13, 14, 15.

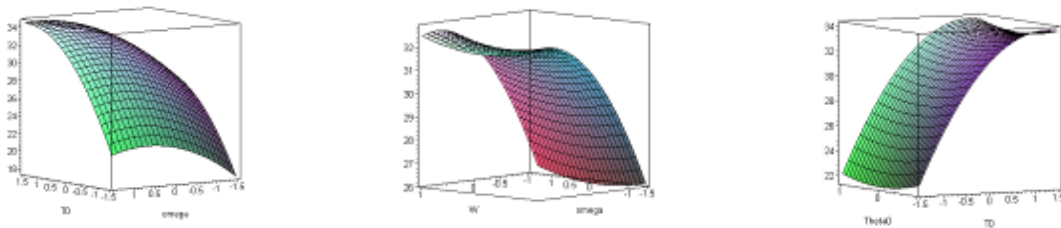


а) б) в)

Рис. 4.1 Залежність температури нагрівання зерна у першій зоні: а) від температури теплоносія та частоти коливань робочого органу випускного апарату; б) від початкової вологості та частоти коливань робочого органу випускного апарату; в) від початкової температури зерна та температури

теплоносія, -

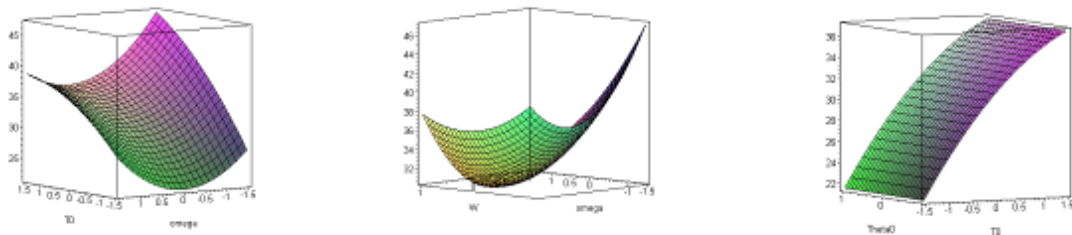
$$\theta_1 = 15.2965 + 0.62726W^2 + 1.75263\omega^2 - 0.68124W\omega + 0.70867W - 2.94644\omega$$



а) б) в)

Рис. 4.2 Залежність температури нагрівання зерна у другій зоні: а) від температури теплоносія та частоти коливань робочого органу випускного апарату; б) від початкової вологості та частоти коливань робочого органу випускного апарату; в) від початкової температури зерна та температури

теплоносія, - $\theta_2 = 31.0195 + 0.67765 W + 1.66376 \omega + 0.38783 W^2 - 0.93756 \omega^2$.

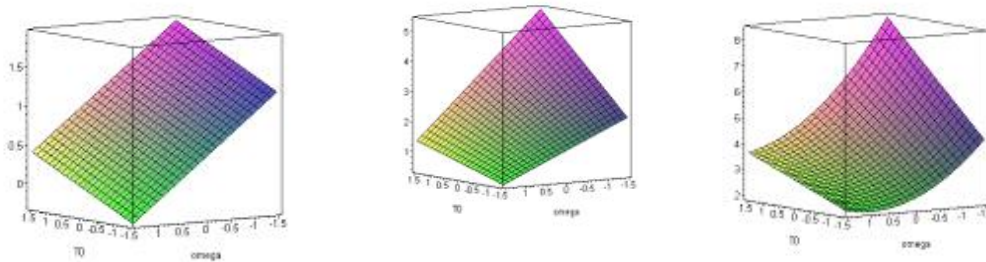


а) б) в)

Рис. 4.3 Залежність температури нагрівання зерна у третій зоні: а) від температури теплоносія та частоти коливань робочого органу випускного апарату; б) від початкової вологості та частоти коливань робочого органу випускного апарату; в) від початкової температури зерна та температури

теплоносія, -

$$\theta_2 = 31.4087 - 2.68952 W + 1.30561 \omega + 2.0125 W \omega + 2.19514 W^2 + 2.54524 \omega^2$$



а) у першій зоні

$$W_1 = 0.8264 + 0.23164T_0 - 0.51101\omega$$

б) у другій зоні

$$W_2 = 2.356 + 0.67679T_0 - 0.9875\omega - 0.2375T_0\omega$$

в) у третій зоні

$$W_3 = 3.7241 + 0.94457T_0 - 1.17863\omega - 0.275T_0\omega + 0.39794\omega^2$$

Рис. 4.4 Залежність вlagосьма від початкової температури теплоносія та частоти коливань робочого органу випускного апарату: а) у першій зоні;
б) у другій зоні;
в) у третій зоні

Поверхні, що реалізують процес сушіння в першій зоні, кажуть, що температура нагріву зерна (малюнок – 12а, б, в) у першій зоні прямопропорційна початковій температурі зерна, залежність близька до лінійної. Це можна пояснити тим, що в цій зоні більша частина теплоти витрачається на нагрівання зерна при невеликому вологозніманні (малюнок – 15а), при цьому процес вологознімання в межах досліджуваної області значень протікає залежно від близької до лінійної.

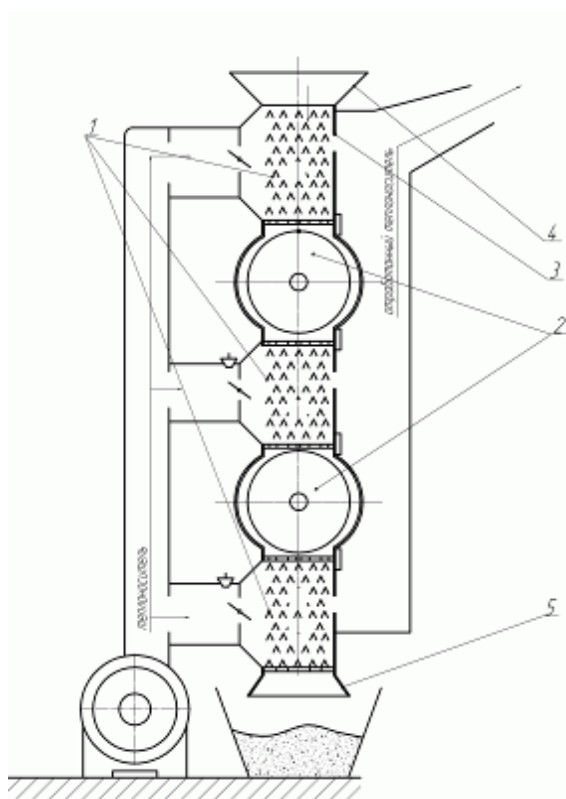
Поверхні, що реалізують процес сушіння (нагрів малюнок – 13а, б, в) у другій зоні, мають явно виражену оптимуму (мінімуму), яка проектується на площину () W_0, θ_0 фактично по лінії $W_0 = 0$ та $\theta_0 = 0$. Дана лінія є область оптимальності, в якій нагрівання зерна мінімальне і, отже, практично вся теплота йде на випаровування вологи.

При відхиленні параметрів області оптимальності нагрівання зерна різко зростає. Закономірність зміни вологознімання (Малюнок – 15б) у цій зоні має також оптимальний (найінтенсивніший) характер, аналогічний до попередньої зони. Це стало можливим завдяки диференціювання режимних

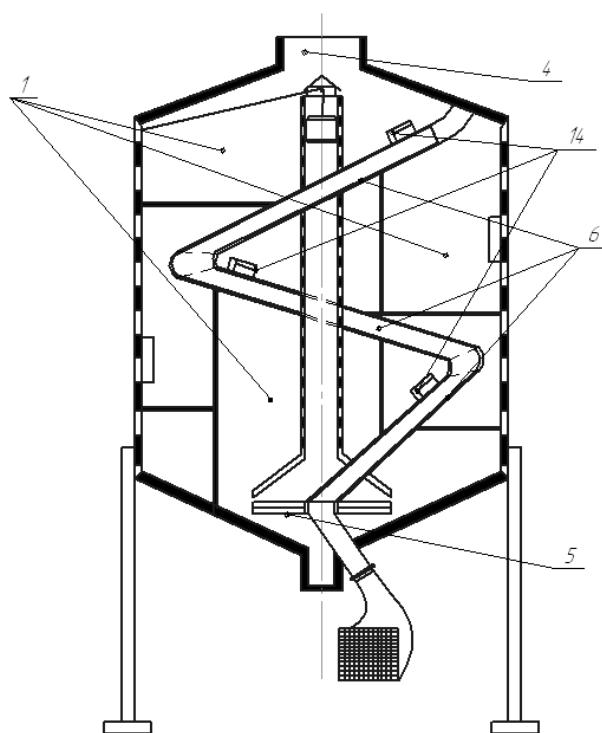
параметрів та оптимізації температури нагріву зерна по зонах сушильної камери.

Поверхні, що реалізують процес сушіння в третій зоні, характеризується тим, що кривизна поверхні нагріву (рисунок - 14а, б, в) пов'язана, головним чином, з параметром початкової вологості. Залежність вологості (малюнок – 15в) аналогічна зонам 1 і 2 і має лінійний характер.

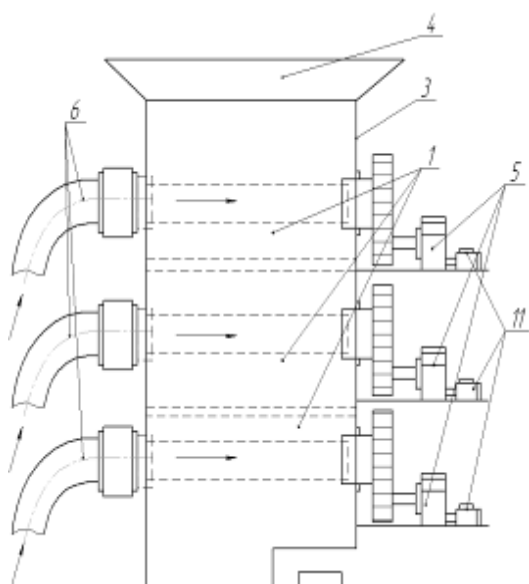
Це підтверджує правильність прийнятих теоретичних припущень оптимальності пропонованого позонного способу сушіння.



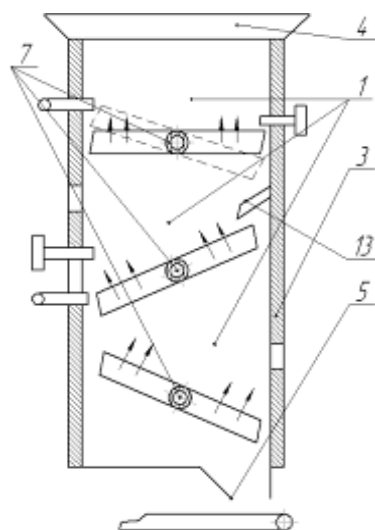
а) позонна шахтна зерносушарка із зонами лежіння



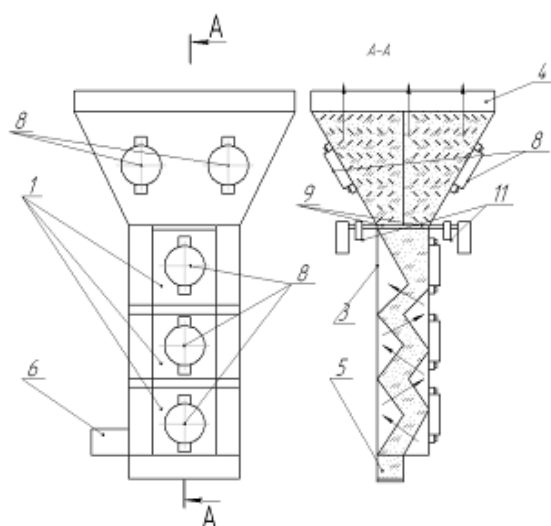
б) бункерна зонна зерносушарка



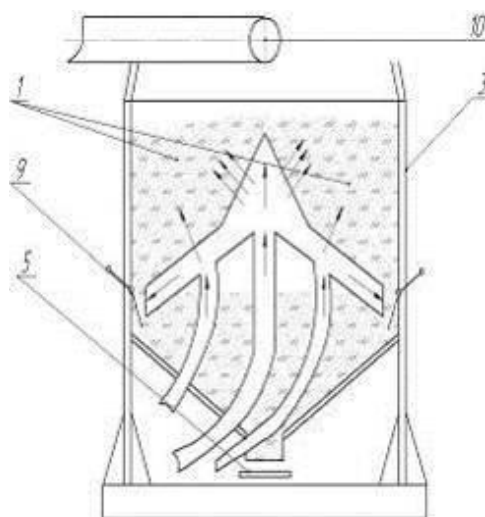
в) шахтна секційно-ярусна сушарка



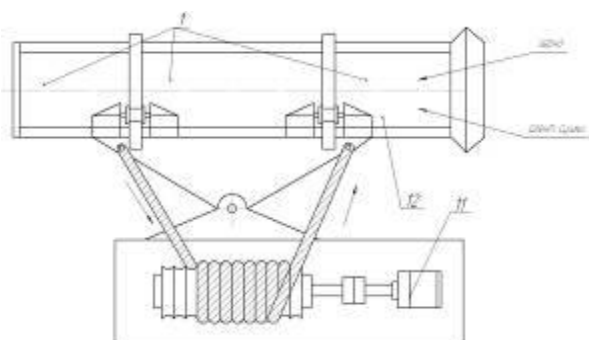
г) шахтна ярусна сушарка



д) конвективно-кондуктивна багатоярусна сушарка



е) камерна сушарка



ж) барабанна сушарка

Рис. 4.5 Варіанти реконструкції зерносушарок на позонний спосіб сушіння:

1 - зони сушіння, 2 - зони відлеження з пристроєм для перемішування зерна, 3 - шахта сушарки, 4 - завантажувальний бункер, 5 - випускний апарат, 6 - дифузор, що підводить, 7 – поворотний схил; 8 - вібратор магнітно-імпульсної дії; 9 – випускна заслінка; 10 - транспортер, що подає; 11 – електродвигун; 12 - сушильний барабан; 13 - козирок-відбійник; 14 – механізм регулювання розподілу повітря

Отримані теоретичні та практичні результати досліджень покладено в основу побудови диференційованих режимів сушіння реконструйованих на позонний спосіб зерносушильних агрегатів та розробки позонних зерносушарок.

Наведені на малюнку 16 схеми влаштування позонних зерносушарок наочно демонструють простоту та ефективність запропонованих рішень.

Результати імітаційного моделювання підтвердили, що використання розробленої системи моделей дозволяє здійснювати вибір ефективних режимів сушіння у зерносушарках сільськогосподарського призначення.

У п'ятому розділі наводяться результати системної ідентифікації моделей процесу сушіння зерна для зерносушарок різних типів, дається оцінка коректності імітаційних моделей та комплексна оцінка ефективності запропонованих рішень щодо реалізації позонного способу сушіння зерна.

Ідентифікація багаторівневої моделі проводилася з використанням багатостадійної процедури та включала структурну, функціональну та параметричну ідентифікацію. Для моделей першого рівня (статика процесу сушіння), що являють собою систему нелінійних (білінійних) рівнянь алгебри, запропонована перша стадія ідентифікації, заснована на експериментальному способі, який реалізований з використанням теплового зонда нестационарного теплового потоку. Для моделей другого рівня (кінетика процесу сушіння) є системою звичайних диференціальних рівнянь другого порядку, запропонована друга стадія ідентифікації, заснована на порівняльному способі, що реалізує спеціальний варіант методу найменших квадратів. Для

моделей третього рівня (динаміка процесу сушіння), що являють собою систему диференціальних рівнянь у приватних похідних параболічного типу, запропонована третя стадія ідентифікації, що реалізує теоретичний спосіб, заснований на вирішенні зворотних завдань тепломасопереносу.

Моделі перших трьох рівнів описують процеси у шарі зернового матеріалу. Конкретний вид рівнянь різний кожному за типу шарів.

Для моделей четвертого рівня, узагальнено описують процес сушіння в сушильній камері (узагальнена результуюча динаміка процесу сушіння зерна), що являють собою систему звичайних диференціальних рівнянь, запропонована заключна стадія ідентифікації (в якості початкового наближення ідентифікованих значень модельних коефіцієнтів адаптивний метод і реалізує багатокроковий алгоритм вирішення зворотного завдання.

Результати ідентифікації моделей (11) та (12) наведені в таблиці 4.

Таблиця 4.1. Значення модельних коефіцієнтів параметрів

Тип сушарки	Вид зерна	Коефіцієнти				Спосіб отримання	Параметри зернового матеріалу	
		K_{α}^c	K_{α}^v	K_{β}	K_{δ}		$A = \frac{m(1-\varepsilon)}{Rc}$	$B = \frac{r}{100c}$
Шахтна ЗЗШ-8	Жито «Єнісейка»	0,62	0,88	0,030	0	ОЗ ТМО	3,73	12,0
Шахтна СЗШ-16	те ж Овес «Сельма»	0,67	0,83	0,027	0	те ж	3,73	12,0
те ж	Ячмінь	0,64	0,90	0,023	0	те ж	3,79	11,9
Барабанна СЗСБ-4	«Собольок» Пшениця	1,29	0,12	0,41	0,82	МНК	4,21	11,8
Барабанна СЗСБ-8	«Омська» Жито	1,38	0,27	0,36	0,91	те ж	4,25	11,6
те ж	«Єнісейка»	1,43	0,32	0,32	0,95	те ж	4,08	12,0

Для кукурудзи при збільшенні потужності в 1,5 рази (рис.3.2) спостерігається відповідне зменшення часу сушіння. Час процесу сушіння до відносної вологості продукту у 10-12% займає 45...70 хвилин.

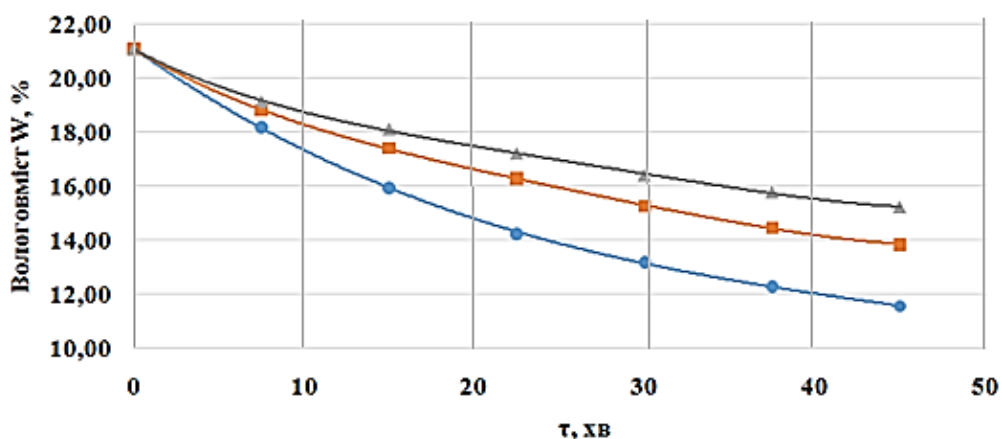


Рис. 4.6 Вплив потужності на кінетику сушіння кукурудзи. де N , кВт/м²: ▲ – 7,33, ■ – 9,17, ● – 11.

Для соняшника при збільшенні потужності в 1,25 та 1,5 рази (Рис.3.3) годину процесу сушіння зменшується в 1,3 та 1,75 рази. Сушіння до відносної вологості продукту у 9,5-11% займає 38...70 хвилин., швидкість сушіння зростає на 37%.

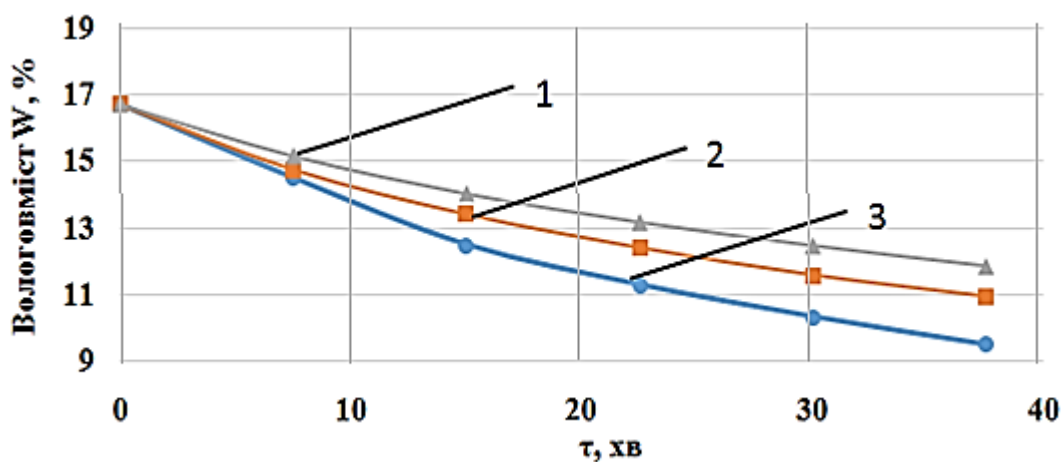


Рис. 4.7 Вплив потужності на кінетику сушіння соняшника. де, 1 - $N = 7,33$ кВт/м²; 2 - $N = 9,17$ кВт/м²; 3 - $N = 11$ кВт/м².

Для сої швидкість сушіння зростає на 36% (рис. 4.7). Швидкість сушіння змінюється в межах 0,06...0,32%/хв.

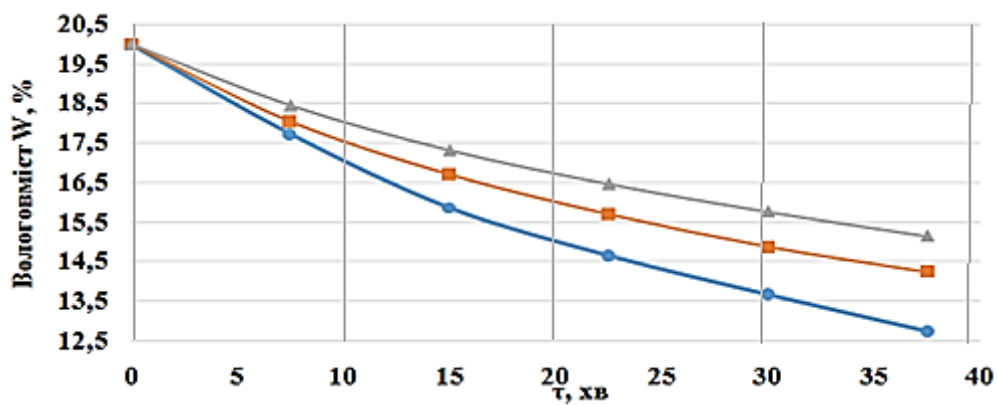


Рис. 4.8 Вплив потужності на кінетику сушіння сої де N , кВт/м²: ▲ – 7,33, ■ – 9,17, ● – 11.

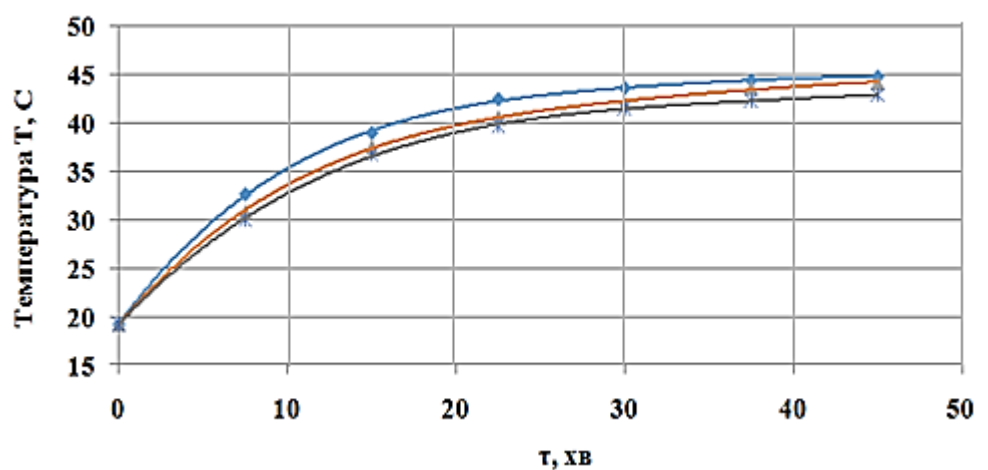


Рис. 4.9 Вплив потужності на температуру кулі кукурудзи де N , кВт/м²: * – 7,33, ■ – 9,17, ● – 11.

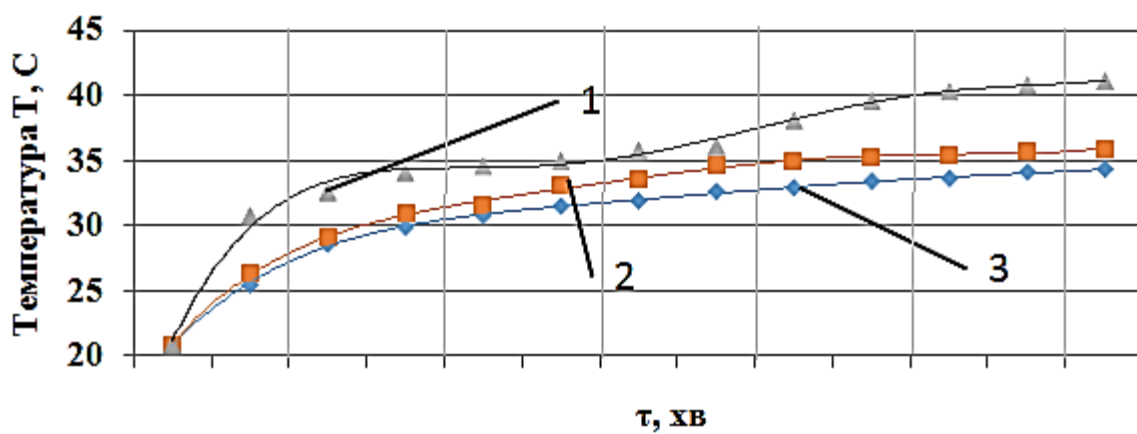


Рис. 4.10 Вплив потужності на температуру підсолнечника де, 1 – $N = 11$ кВт/м²; 2 – $N = 9,17$ кВт/м²; 3 – $N = 7,33$ кВт/м²;

Обробка експериментальних даних проводилася з використанням наступних програмних пакетів MS Excel та MathCad. Розглянувши криві швидкості сушіння (рис. 4.11) у напівлогарифмічних координатах (рис. 4.12) спостерігаємо лінійний характер графіків.

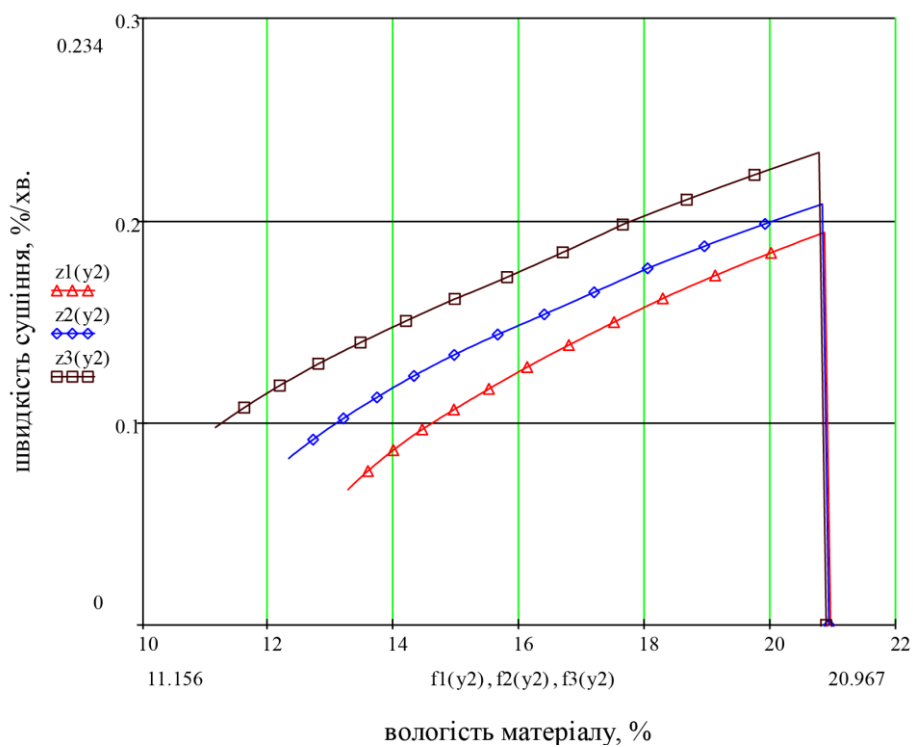


Рис. 4.11 Криві швидкості сушіння

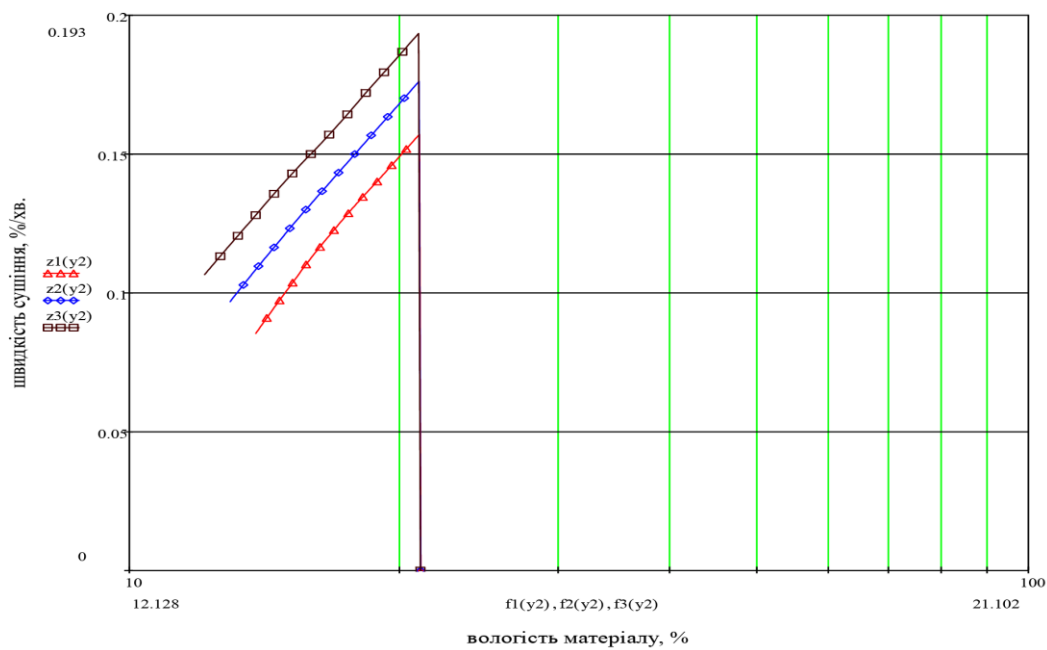


Рис. 4.12 Криві швидкості сушіння у напівлогарифмічних координатах

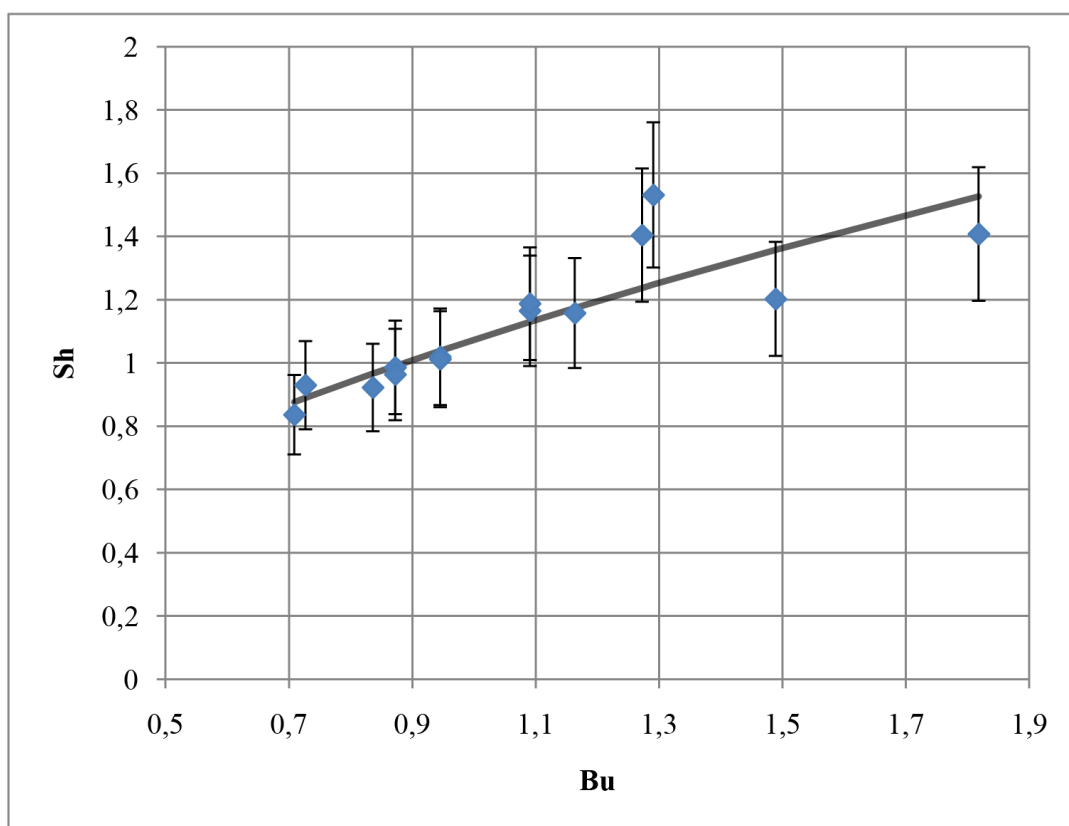


Рис. 4.13 Залежність числа Sh від числа Bu при $Re=242$ для ІЧ сушіння

Соняшника

Отримані термограми сушіння показують, що при швидкостях стрічки більших за 0,018 м/с температура продукту за годину сушіння не досягає гранично допустимої на всьому діапазоні зміни питомої потужності випромінювачів. Для швидкості стрічки 0,007 м/с при питомій потужності СВЧ випромінювача 15 кВт/м² температура насіння соняшнику перевищила 65°C.

Отримані криві швидкості сушіння кукурудзи, соняшника та сої в напівлогарифмічних координатах мають лінійний характер, що дозволяє використовувати рівняння 3.1 для визначення часу сушіння.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз стану досліджуваної проблеми дозволив встановити, що одним з ефективних способів поліпшення технологічного процесу сушіння зерна, підвищення якості, зменшення кількості перепусток і витрат є застосування позонного способу з диференційованим завданням режимів, що забезпечує підтримку стаціонарного процесу незалежно від зовнішніх впливів, що обурюють. Технологічний процес сушіння в зерносушарках с.-г. призначення є багатовимірною багатозв'язковою системою, яка може бути формалізована функціональною моделлю з вхідними (обурюючими та керуючими) та вихідними параметрами.

Розроблена загальна багаторівнева модель процесу сушіння дозволила одержувати імітаційні моделі типових шарів зернового матеріалу, що відрізняються кодом диференціального оператора, числом рівнянь, порядком значень модельних коефіцієнтів. Отримані на основі розробленої методики системи диференціальних рівнянь включають тільки основні вимірювані змінні стани, режимні параметри і ідентифіковані модельні коефіцієнти і характеризуються властивостями грубості, гнучкості, спільності і простоти. Проведений чисельний експеримент на основі узагальнених моделей зерносушарок усіх типів дозволив виявити напрями їх реконструкції та модернізації та визначити раціональні параметри та режими сушіння зерна.

Теоретичні та експериментально-експлуатаційні дослідження, отримані оцінки структури та моделі «вхід-вихідних» характеристик (представлених у вигляді лінеаризованих диференційованих рівнянь із змінними коефіцієнтами, що є функціями від рішень моделі стаціонарного режиму сушіння зерна) дозволили розробити алгоритми та програми визначення частотні характеристики, перехідні процеси. Зіставлення розрахункових показників з експериментальними показує, що неузгодженість вбирається у 5...8%. Найбільш сильними зв'язками в цій системі, що мають найбільші значення коефіцієнтів (0,70...0,80), є два основні канали - температура агента сушіння на вході в сушильну зону - температура зерна на виході з зони сушіння і експозиція сушіння в цій зоні - «вологість зерна на виході із цієї зони

сушіння». Отримані числові значення оціночних показників доводять, що пропоновані диференційовані режими зерносушилок позонних інтенсифікують процес сушіння.

Обґрунтовані технологічні процеси позонного сушіння зерна в різних механізованих пристроях, що реалізують ефективні режими сушіння з інтенсифікацією та взаємним узгодженням внутрішнього і зовнішнього вологообміну та збалансованістю взаємодії зернових шарів і потоків сушильного агента, дозволили розробити конструкції значно більшою рівномірністю розподілу агента сушіння та можливістю регулювання його витрати та температури, - на відміну від існуючих бункерних і шахтних, у яких напір агента сушіння у верхній частині сушильної камери зменшується в 2...3 рази (причому в бункерних, крім того, різко зменшується і по ширині, зменшуючись у верхній зовнішній частині 6-7 разів). Третю групу установочно-коригувальних параметрів управління по зонам (модулям) сушильних камер пропонованих конструкцій зерносушарок складають експозиції сухого матеріалу в цих зонах. Це дозволяє скоротити кількість перепусток, і в більшості випадків обмежуватися одноразовим, що значно скорочує витрати та підвищує якість сушіння.

На підставі проведених лабораторних досліджень встановлено залежності теплофізичних параметрів зернових культур від вологості та температури, які після їх перетворення з використанням критеріїв подібності Re та Nu прийняті як початкові наближення модельних коефіцієнтів. Розроблені алгоритми ідентифікації, об'єднані в багатоступінчасту систему, дозволяють проводити: налаштування моделі та її алгоритмізацію з розв'язанням оптимізаційних задач у режимі реального часу; передрахування оціночних характеристик; прогнозування вихідних параметрів; контроль змінних стану та управління процесами сушіння зерна у режимі реального часу.

Розроблена модель моніторингу процесів сушіння зерна дозволила обґрунтувати систему позонного контролю параметрів стану. Методика контролю якості технологічного процесу дозволила встановити граничні

значення дисперсії вхідної вологості зерна (залежно від m_{w_0}), за яких вихідний процес не виходить за межі агротехнічних вимог. При цьому ймовірність збереження допуску (відносна тривалість нормального функціонування технологічного процесу) зростає з 0,45...0,60 (у існуючих) до 0,70...0,80 (в реконструйованих) та 0,75...0,85 (у пропонованих) зерносушарках.

Встановлено, що для інтенсифікації процесу сушіння зерна за продуктивністю необхідно здійснювати диференційоване підведення сушильного агента по висоті сушильної камери, розділеної у відносинах 1:(1–2):1 а використовувати (в усіх випадках, коли це дозволяють якісні характеристики сухого матеріалу та обумовлено схемою технологічних процесів) спадний метод побудови режимів за температурою сушильного агента, або зростаюче-убутній (інакше). При побудові диференційованих режимів сушіння, визначенні гранично допустимих значень температури нагріву зерна ($Q_{доп}$) необхідно враховувати не тільки вологість W_{oi} , а й температуру Q_{oi} , а також експозицію сушіння в цій зоні та режим сушіння в попередній зоні ($i-1$), що дозволяє забезпечувати необхідну збалансованість процесів за параметрами часу, швидкостей, температури та вологознімання, які визначаються за розробленими регресійними моделями позонної сушіння зерна, що задає величини основних параметрів стану на виході кожної з трьох зон сушіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aliev E.B., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V. M., Trukhanska O.O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. INMATEH - Agricultural Engineering. 2018. Vol. 54, №1. P. 95-104.
2. Aliev Elchin, Pryshliak Viktor, Yaropud Vitaly Research of physical and mechanical properties of oil seed crops. MOTROL: mmission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2017. Vol. 19., № 3. P. 103-108.
3. Pirchio M., Fontanelli M., Frasconi CE Autonomous Mower vs. Rotary Mower: Effects on Turf Quality and Weed Control in Tall Fescue Lawn. Agronomy. 2018. Vol. 8, Is. 2. P. 15-24.
4. Zastempowski M., Bochat A. Modeling of cutting process by the shear-finger cutting block. Applied engineering in agriculture. 2014. Vol. 30, Is. 3, P. 347-353.
5. Агулов І. І., Вознюк Л. Ф., Левчій О. В. Довідник по технічному обслуговуванню сільськогосподарських машин. Київ : Урожай, 1989. 252 с.
6. Алієв Е.Б., Яропуд В.М. Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №2. С. 19-23.
7. Анікеев А.И. Цыганенко М.А., Сыровицкий К.Г., Коваль А.Р. К вопросу повышения эффективной процесса уборки урожая путем внедрения элементов агрологистики. Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Vol. 18, № 7. Polish Academy of Sciences. 2016. С.49 - 54.
8. Анікеев О.І., Сыровицький К.Г., Агапов М.О., Бойко А.О. Методика обґрунтування раціонального складу і швидкісного режиму роботи машинних агрегатів. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. № 18 (2019), 62-69.
9. Бакум М. В., Нікітін С. П., Сергєєва А. В. Проектування сільськогосподарських машин : навч. посіб. Харків : Харк. держ. техн. ун-т с.-г., 2003. 336 с.
10. Веселовська Н.Р., Малаков О.І., Бурлака С.А. Математичне моделювання механізму вивішування косарки-плющилки причіпної КПП-4.2. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2019. №4. С. 5-10.

Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2010. №4. С. 24-29.

11. Вірник М.М., Солона О.В. Алгоритми кінематичного і силового аналізу важільних механізмів з гідроприводом. Збірник наукових праць

12. Войтюк Д. Г., Булгаков В. М., Кропивко С. В., Онищенко В. Б. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: підруч. для студ. вузів. Київ : Друк, 2005. 464 ^

13. Войтюк Д. Г., Яцун С. С., Довжик М. Я. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку: навч. посіб. Суми : Унів. кн., 2008. 543 с.

14. Войтюк Д.Г., Іщенко Т.Д. та ін. Сільськогосподарські та меліоративні машини: підручник. За ред. Д.Г.Войтюка. К.: Вища освіта, 2004. 544 с.

15. Гунько І.В., Браніцький Ю.Ю., Токарчук О.А. Засоби механізації процесу збирання та подрібнення біоенергетичних культур. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №2. С. 129-134.

16. Гунько І.В., Коваль Л.Г. Енергоощадні безконтактні методи діагностування показників технічного стану мобільної сільськогосподарської техніки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2016. №3. С. 89-93.

17. ДСТУ 46.012-2000. Техніка сільськогосподарська. Методи економічної оцінки техніки. [Чинний від 2001.02.01]. К. : Мінагрополітики України, 2000. - III, 18 с. - (Галузевий стандарт України).

18. Дудак С.М., Грицака О.М., А.В. Спирін Кінетика процесу вимолоту зерна зернозбиральними комбайнами. Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Технічні науки. 2015. №1, Т.1. С. 53-56.

19. Іскович-Лотоцький Р.Д., Зелінська О.В., Н.Р. Веселовська, Веселовський Я.П. Оцінювання ефективності функціонування технологічного комплексу з використанням системного підходу. Техніка енергетика транспорт АПК. 2017. №2. С. 109-114

20. Калетнік Г.М., Булгаков В.М., Черниш О.М., Кравченко І.Є.,

Солона О.В., Цуркан О.В. Технічна механіка. Підручник. Київ : «Хай-Тек-Прес», 2011. 340 с.

21. Калетнік Г.М., Скорук О.П., Токарчук Д.М. Інженерний менеджмент. Методичні вказівки до виконання курсової роботи для студентів факультету механізації сільського господарства спеціальності 8.091902 «Механізація 79 сільського господарства» форма навчання денна і заочна. Вінниця: ОЦ ВДАУ, 2009. 68 с.

22. Кінницький Я.Т., Харжевський В. О., Марченко М. В. Теорія механізмів і машин в системі MathCAD: навчальний посібник. Хмельницький : РВЦ ХНУ, 2014. 324 с.

23. Ковбаса В.П., Солона О.В., Спірін А.В., Цуркан О.В. Про спрощення критерію вигляду напружено-деформованого стану суцільного середовища. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2018. №1, Т.1. С. 44-49.

24. Котов Б.І., Спірін А.В., Зозуляк О.В. Моделювання та ідентифікація процесу сепарації дрібного вороху вібраційно-повітряними очистками зернозбирального комбайну. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №1. С. 26-29.

25. Кравец І.А., Щепетов В.В, Максимов С.Л., Гладкий Я.Н. Энергетика безсервисных систем. Проблемы трибологии. 2002. №2. С. 12-14.

26. Купчук І.М. Компромісна оптимізація режимних параметрів процесу подрібнення зернової сировини при виробництві етилового спирту. Вібрації в техніці та технологіях. 2017. №4. С. 91-100.

27. Купчук І.М. Перспективи розвитку конструктивних схем вібраційних приводів транспортних і технологічних машин АПК. Вібрації в техніці та технологіях. 2018. №3. С. 44-52.

28. Купчук І.М., Браніцький Ю.Ю. Розробка програмного алгоритму розрахунку кінематичних параметрів робочих органів віяльно-калібрувальної машини. Вібрації в техніці та технологіях. 2018. № 2. С.80-87.

29. Лауш П.В., Василенко І.Ф., Лесюк Т.П. та ін. Технічне обслуговування та ремонт сільськогосподарської техніки: підручник в 2-х ч. За редакцією П.В.Лауша та І.Ф.Василенка. Кіровоград: ПОЛІМЕД-Сервіс,

2007.

30. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: [підручник для студентів технічних спец. вузів] К.: Знання-Пресс, 2003. 511с.

31. Машины для предварительной очистки зерна [Электронный ресурс] БІ^://1екли.01^ЛЗ-18378.html

32. Мельник В.И., Анিকেев А.И., Цыганенко М.А., Сыровицкий К.Г. Экономическая эффективность элементов системы точного земледелия. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol. 17, No. 7, 2001. с. 61-66.

33. Мельник В.І., Романащенко О.А., Анікеєв О.І., Фесенко Г.В. Удосконалення роторного розкидача органічних добрив. Інженерія природокористування, № 2 (10), 2018. с. 59-62.

34. Музичук В. І., Анісімов В. Ф. Організація робіт підприємств технічного обслуговування: навчальний посібник. Вінниця: ФОП Рогальська І.О., 2012. 240 с.

35. Музичук В. І., Нахайчук О. В., Комаха В. П. Визначення змісту і об'єму робіт при технічному сервісі. Зб. наук. пр. ВНАУ. Серія: Технічні науки. Вінниця: ВНАУ, 2012. Вип. 11(65). С. 242–247.

36. Надикто В.Т., Крижачківський М.Л., Кюрчев В.М., Абдула С.Л. Нові мобільні енергетичні засоби України. Теоретичні основи використання в землеробстві: навчальний посібник. – Мелітополь, 2005. – 337 с., іл.

37. Павленко В.С., Паламарчук І.П., Цуркан О.В., Полевода Ю.А. З'єднання в машинобудуванні: навч. посібник. Вінниця: ПП «ТД Едельвейс і К», 2015. 110 с.

38. Павленко В.С., Цуркан О.В., Кравченко І.Є., Любін М.В. Пасові передачі. Теорія, розрахунки, конструювання : навчальний посібник. Київ : «Хай-Тек Прес», 2011. 140 с.

39. Панченко А.І., Волошина А.А. Сучасні трактори сільськогосподарського призначення. Трактори країн СНД: посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. 176 с.

40. Патент №120020, МПК В07В 4/02. Пневматический сепаратор для

сипкого матеріалу. №а2012116693/03; заявл.: 24.04.2012; опуб. 10.09.2012. Бюл. № 25. С. 3.

41. Патент №135944, МПК В07В 4/00. Пристрій для розподілу сипких матеріалів на фракції. №и2013131485/03; заявл. 9.07.2013; опуб. 27.12.2013. Бюл. №36. С. 3.

42. Патент №146703, МПК А0[^] 12/00. Агрегат для очистки насіння. №и2014119451/13; заявл. 14.05.2014; опуб. 20.10.2014. Бюл. №29. С. 3.

43. Патент №165721, МПК А01F 7/00. Самопересувний агрегат для обмолоту та пневмосепарації зернового вороху. №[^]016115197/13; заявл. 20.04.2016; опуб. 10.11.2016. Бюл. №31. С. 3.

44. Погорілець О.М., Волянський М.С. Гідропривод, Войтюк В.Д., Пастушенко С.І. сільськогосподарської техніки. Навчальне видання. за ред. Погорільця О.М. К.: Вища освіта, 2004. 368 с.

45. Пришляк В. М., Ковальчук О. В. Сільськогосподарські машини: метод. вказівки для виконання лаб. робіт студ. фак. механізації с.-г. Вінниця : ВДАУ, 2005. 44 [^]

46. Рубльов В.І., Войтюк В.Д. Управління якістю технічного сервісу і сільськогосподарської техніки при постачанні: посібник. 2-е видання доп. К.: Видав НАУ, 2006. 236 с.

47. Рудницький Б.О., Антонів СФ., Запрута О.А. Особливості технології вирощування насіння нових та перспективних сортів бобових трав в умовах Лісостепу України. Сільське господарство та лісівництво. 2017. Вип. №7, Т. 2. С. 70-76.

48. Серeda Л.П. Перспективи і напрямки розвитку сучасного механізованого сільськогосподарського виробництва (Частина I «Сучасні напрямки розвитку технологій в рослинництві»): Методичні вказівки по вивченню дисципліни та виконанню практичних робіт, Вінниця РВВ ВНАУ, 2020. 128 с.

49. Сивак І.О., Деревенько І.А., Островський А.Й. Практикум з механіки матеріалів і конструкцій : навчальний посібник.. Вінниця : ВНАУ, 2011. 144 с.

50. Сивак Р.І., Деревенько І.А. Короткий курс теоретичної механіки.

Вінниця: ТОВ «Вінницька міська друкарня», 2016. 200 с.

51. Сидорчук О. В., Котенко С. С., Василенко М. О., Кучерявий В. М. Проблеми технічного сервісу сільськогосподарської техніки. Механізація та електрифікація сільського господарства. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. Т.2. Глеваха, 2014. Випуск 99. С. 299-307.

52. Солона О. В., Купчук І.М. Теорія механізмів і машин. Курсове проектування : Навчальний посібник. Вінниця : ВНАУ, 2019. 249 с.

53. Солона О.В. Статика взаємодії абсолютно твердих тіл із сипучим середовищем. Вібрації в техніці та технологіях. 2018. №3. С. 105-116

54. Солона О.В., Купчук І.М. Практикум з Теорії механізмів і машин : навчальний посібник. Вінниця : Друк, 2020. 250 с.

55. Солона О.В., Купчук І.М. Прикладна механіка. Методичні рекомендації для виконання практичних робіт. Вінниця : ВНАУ, 2017. 116 с.

56. Солона О.В., Купчук І.М., Паламарчук В.І. Прикладна механіка. Методичні рекомендації для виконання курсового проекту. Вінниця : ВНАУ, 2017. 84 с.

57. Спирін А.В., Котов Б.І., Зозуляк О.В. Моделювання та ідентифікація процесу сепарації дрібного вороху вібраційно-повітряними очистками зернозбирального комбайну. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2016. №4. С. 42-45.

58. Тарасенко А.П. Влияние схемы размещения решет в решетном стане на фракционирование зернового вороха. Техника в сельском хозяйстве. 2006. №3. С. 32-34.

59. Тарасенко А.П. Фракционирование зернового вороха на решетках. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2012. №5. С. 26-29.

60. Твердохліб І.В. Дослідження процесу витирання насінневого вороху люцерни. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №4. С. 77-83.

61. Тіщенко Л.М., Мельник В.І., Харченко С.О. Каталог сільськогосподарської техніки. Навчальний посібник. Харків: ХНТУСГ, 2015. 450 с.

62. Труханська О.О. Підвищення якості ремонту і технічного

обслуговування сільськогосподарської техніки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2018. №3. С. 109-119.

63.Хамуев В.Г., Гуляев А.А., Бойко А.А. Justification of the design of pneumatic sorting machine for preparation of selection seeds MATEC Web Conferences.- 2018. - Vol. 224. - Номер статті 05010. - (International Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018)/-URL: https://www.mateconferences.org/artides/mateconf/pdf/2018/83/mateconf_icmtmte2018_05010.pdf

64.Цуркан О.В. Павленко В.С., Полевада Ю.А. Розрахунки передач привода: Методичні вказівки до виконання курсового проекту з навчальної дисципліни «Деталі машин». Вінниця : РВВ ВНАУ, 2011. 87 с.

65. Черновол М.І., Булей І.А., Кропівний В.М., Технологічні планування підприємств і їхніх підрозділів з ремонту та технологічного обслуговування тракторів. Автомобілів і іншої сільськогосподарської техніки. Альбом: Навчальний посібник – Кіровоград: Кіровоградський державний технічний університет, 1999. 175с.

66.Швець Л.В., Паладійчук Ю.Б., Труханська О.О. Технічний сервіс в АПК: навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2019. 648 с.

67.Стручаєв М. І. Визначення тривалості процесу сушки сінажу. Праці ТДАТА. 2015. Вип. 33. С. 46–49.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Програма побудови траєкторії та визначення середньої швидкості V_{CP} транспортування частинок верхнього шару вздовж робочої поверхні

```

Cls
g = 9.81
pi = 3.141592654
a1 = 0.025
n = 300
l1 = 3.5
f = 0.3
l2 = (l1 * pi) / 180
w = (pi * n) / 30
a2 = a1 * w ^ 2
u1 = Atn(Sin(l2) / Sqr((f * Cos(l2)) ^ 2 - (Sin(l2)) ^ 2))
u2 = Atn((g * Sin(l2)) / a2)
u3 = (u1 + u2) / 2
z1 = (g * f * Cos(l2) * Cos(u3)) / a2
z2 = -z1
Print "A="; a1; "n="; n; "w="; w; "Aw^2="; a2
Print "z+="; z1
SLEEP
Cls
If z1 <= 0.537 Then
c1 = (pi * z1) / 2
c2 = Sqr(1 - c1 ^ 2)
d1 = Atn(c2 / c1)
d2 = d1 + pi
d3 = d2 + pi
Print "d1+="; d1; "d2+="; d2; "d2-="; d3
SLEEP

```

```

Cls
For d = d1 To 4.483934 Step 0.1
s1 = Cos(d1) + z1 * d1
y = a1 * (s1 * (d - d1) - (Sin(d) - Sin(d1))) - (z1 / 2) * (d ^ 2 - d1 ^ 2)
s2 = Sin(12) - f * Cos(12) * Sin(u3)
x = ((g / w ^ 2) * (-s2 * d1 * (d - d1) + s2 * ((d ^ 2 - d1 ^ 2) / 2)) * 3.21)
Print "y="; y; "x="; x; "d="; d
Print " "
Next d
End If
SLEEP
Cls
If z1 < 0.537 Then
For d = d2 To 4.93905 Step 0.1
s4 = Cos(d2) + z2 * d2
y = a1 * (s4 * (d - d2) - (Sin(d) - Sin(d2))) - (z2 / 2) * (d ^ 2 - d2 ^ 2)
s5 = Sin(12) - f * Cos(12) * Sin(u3)
x = ((g / w ^ 2) * (-s5 * d2 * (d - d2) + s5 * ((d ^ 2 - d2 ^ 2) / 2)) * 3.21)
Print "y="; y; "x="; x; "d="; d
Print " "
Next d
End If
If z1 > 0.537 Then
d4 = Atn(z1 / Sqr(1 - z1 ^ 2))
flag = 0
For d = d4 To 2 * pi Step 0.001
v1 = Cos(d4) - Cos(d) - z1 * (d - d4)
If v1 <= 0 And flag = 0 Then
d5 = d
flag = 1
End If

```

```

Next d
d6 = d4 + pi
flag = 0
For d = d6 To 4 * pi Step 0.001
v2 = Cos(d6) - Cos(d) - z2 * (d - d6)
If v2 >= 0 And flag = 0 Then
d7 = d
flag = 1
End If
Next d
For d = d4 To d5 Step 0.001
s3 = Cos(d4) + z1 * d4
y = a1 * (s3 * (d - d6) - (Sin(d) - Sin(d6)) - (z1 / 2) * (d ^ 2 - d6 ^ 2))
x = (g / w ^ 2) * (-s2 * d4 * (d - d4) + s2 * ((d ^ 2 - d4 ^ 2) / 2))
Print "y="; y; "x="; x; "d="; d
Next d
End If
Y1 = 2 * a1 * Sqr(1 - ((pi * z1) / 2) ^ 2)
X1 = ((2 * pi ^ 2 * g) / w ^ 2) * s2
Print "y+="; Y1; "x="; X1
End

```

ДОДАТОК Б

Програма розрахунків початку та закінчення відносного руху частинки
нижнього шару робочої поверхні

```

Cls
g = 9.81
pi = 3.141592654
a1 = 0.025
n = 250
l1 = 7.1
f1 = 0.1
f2 = 0.1
f3 = 0.3
m1 = 0.68
l2 = (l1 * pi) / 180
w = (pi * n) / 30
a2 = a1 * w ^ 2
u1 = Atn(Sin(l2) / Sqr((f3 * Cos(l2)) ^ 2 - (Sin(l2)) ^ 2))
u2 = Atn((g * Sin(l2)) / a2)
u3 = (u1 + u2) / 2
p1 = Atn(f1)
p2 = Atn(f2)
c1 = m1 * f3 * Cos(l2) * (Sin(u3 - p2) / Cos(p2))
c2 = (1 + m1) * (Sin(p1 - l2) / Cos(p1))
z1 = (g / (a2 * (Sin(p2) / Cos(p2)))) * (c1 -
c2) Print "A=="; a1; "n="; n; "w="; w; "Aw^2=";
a2 Print "z+="; z1; "c1="; c1; "c2="; c2 SLEEP
Cls

```



```

If z1 < 0.64 Then
d1 = pi - Atn(z1 / Sqr(1 - z1 ^ 2))
d2 = 2 * pi - Atn(z1 / Sqr(1 - z1 ^ 2))
Print "d1-1="; d1; "d2-1="; d2
flag = 0
For d = pi To d2 Step 0.001
v2 = z1 * (pi - d1) - 1 - Cos(d1)
v1 = v2 + z1 * (d - pi) - (Cos(d) + 1)
If v1 <= 0 And flag = 0 Then
d3 = d
flag = 1
End If
Next d
End If
Print "d1-1="; d1; "d2-1="; d3
SLEEP
Cls
X1 = (z1 / 2) * (pi ^ 2 - d1 ^ 2) - Sin(d1) - (z1 * d1 + Cos(d1)) * (pi - d1)
X2 = X1 + (z1 / 2) * (d3 ^ 2 - pi ^ 2) - Sin(d3) - (2 + z1 * d1 + Cos(d1)) * (d3 -
pi)
x3 = X2 / pi
v2 = a1 * w * f2 * x3
Print "A="; a1; "n="; n; "z+="; z1
Print "vcp="; v2
Print "x1="; X1; "x2="; X2
End

```