

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ПАСІЧНИК БОГДАН АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.3.029

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Удосконалення технологічного процесу теплової обробки зерна

(тема роботи)

208 «Агроінженерія»

(шифр і назва спеціальності)

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

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
Сукманюк Олена Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.і.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

АНОТАЦІЯ

Пасічник Б.А. Удосконалення технологічного процесу теплової обробки зерна. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

Робота присвячена питанням удосконалення технологічного процесу теплової обробки зерна.

В роботі проведений аналіз конструктивних особливостей найбільш найпоширеніших установок для сушіння зерна. Подано теоретичні залежності, що відображають вплив основних діючих факторів на ефективність процесу сушіння зерна.

Обґрунтовано оптимальні режими процесу теплової обробки зерна та конструктивні параметри пристрою кондуктивного та конвективного способу сушіння.

Ключові слова: тепла обробка, зерно, сушіння, пристрій.

ABSTRACT

Pasichnik B.A. Improvement of the technological process of thermal processing of grain. Qualification for the advanced master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

The work is dedicated to improving the technological process of thermal processing of grain.

In the work, an analysis of the design features of the largest and most extensive installations for grain drying is carried out. Theoretical conditions are presented that reflect the influence of the main active factors on the effectiveness of the grain drying process.

Optimal conditions for the process of thermal processing of grain and design parameters for the installation of conductive and convective drying methods have been established.

Key words: thermal processing, grain, drying, device.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНА	6
1.1. Класифікація способів сушіння зерна	6
1.2. Класифікація конструкцій теплової обробки зерна	10
1.3. Принцип використання конвективного способу для нагрівання та сушіння зерна	17
1.4. Висновки по розділу 1	19
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА	20
2.1. Обґрунтування контактного способу сушіння зерна	20
2.2. Обґрунтування параметрів та режимів роботи сушильної установки	22
2.3. Висновки по розділу 2	29
РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНА	30
3.1. Опис установки для сушіння зерна	30
3.2. Методика визначення температури зерна в установці для сушіння зерна	33
3.3. Методика теплофізичних змін зерна	34
3.4. Висновки по розділу 3	38
ВИСНОВКИ	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40

ВСТУП

Збільшення виробництва та підвищення якості зерна є найважливішим завданням, вирішення якого забезпечує продовольчу безпеку України.

При цьому вирішуються як завдання виробництва необхідного об'єму та якості хлібобулочних виробів, так і сировини для харчової промисловості, а також отримання концентрованих кормів для тваринництва і птахівництва.

Особливо актуальним на сьогоднішній день є глибоке перероблення зерна. Тому виключення втрат зерна, збереження його товарних якостей є актуальним питанням.

В процесі післязбиральної обробки та зберігання втрачається близько 10% валового збирання зерна. Це відбувається через невчасне сушіння зерна, ураження його шкідниками та мікроорганізмами. Залежно від технології ґрунтообробки до 30% зерна вже після збирання може бути заражене мікотоксинами, що не дозволяє без спеціальної обробки використовувати його ні в хлібопеченні, ні для кормовиробництва. Тому сушіння та знезараження є важливими елементами технологічного процесу переробки та зберігання зерна.

Енергоємність процесу сушіння становить не менше 20% від енерговитрат виробництва зерна. Тому зниження енергоємності процесу та збільшення продуктивності є одним з основних напрямків наукових дослідженнях з даного питання. Використання сучасних технологій дозволяє підійти до комплексного вирішення проблеми сушіння-знезараження зерна.

Технології сушіння зерна в основному ґрунтуються на методі теплового сушіння, при якому волога із зерна видаляється шляхом випаровування. Фізичні процеси тепло- та вологоперенесення супроводжуються при сушінні зерна складними фізико-хімічними та біологічними змінами, що відбуваються у зерні. Вивчення сутності цих процесів та встановлення їх закономірностей представляє одне з основних завдань науки та технології зерносушіння.

Існуюче обладнання має ряд недоліків, що стримує їх широке застосування, зокрема використання мазуту, газу, дизпалива та інших джерел, що призводить до подорожчання вартості сушіння зерна, а також до забруднення атмосфери (CO₂).

У той же час при переробці невеликих партій зерна в умовах фермерських господарств ефективніше і менш витратне використання контактної сушіння з урахуванням індукційних нагрівачів.

Метою дослідження роботи є удосконалення технологічного процесу теплової обробки зерна на базі індукційної сушарки.

Об'єктом дослідження є процес контактного способу сушіння зерна.

Предметом дослідження є залежності тепло-вологообміну при контактному способі сушіння зерна.

Матеріали та методи. Дослідження проводились на основі патентного пошуку та аналізу літератури про конструкцію пристроїв та способів сушіння сільськогосподарських матеріалів.

Публікації:

Пасічник Б.А. Обґрунтування контактного способу сушіння зерна. Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи». 15-17 листопада 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С.110-113.

Сукманюк О. М., Пасічник Б. А. Класифікація способів сушіння зерна. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених «Інженерні процеси та системи». 14-15 червня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. с.119-122.

Пасічник Б.А. Принцип використання конвективного способу для нагрівання та сушіння зерна. Студентські читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 206-209.

Обсяг та структура роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 40 сторінках машинописного тексту, містить 25 рисунків, списку використаних джерел з 12 найменування.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНА

1.1. Класифікація способів сушіння зерна

«Сушіння зернових – складний технологічний процес, який повинен забезпечити і збереження якості зерна, і покращення деяких його показників». [3] Тому створення раціональних конструкцій сушарок, оптимальний вибір методів і режимів сушіння – як і раніше одна з найважливіших проблем сільського господарства, незважаючи на те, що вже є чимало сучасних зерносушарок як вітчизняного, і зарубіжного виробництва.

Сушіння зерна – це не тільки спосіб зниження вологості зерна, але і при правильно підбраному режимі відбувається фізіологічне дозрівання зерна, що покращує його якість та знищує шкідників.

Порівнюючи різні способи сушіння, можна стверджувати, що сушіння вологих матеріалів не тільки теплотехнічний, а й, перш за все, технологічний процес. Основною метою сушіння зерна є отримання зерна з найкращими властивостями, тому вибір конкретного способу визначається властивостями даного матеріалу та оптимальних режимів сушіння.

«Зерно сушать різними способами, заснованими на двох найважливіших принципах:

- 1) видалення вологи з матеріалу без зміни агрегатного стану (у вигляді рідини);
- 2) видалення вологи з матеріалу зі зміною її агрегатного стану (шляхом перетворення на пар)». [4]

Перший спосіб видалення вологи це сорбційний та механічний.

«Сорбційний спосіб здійснюється за безпосереднього контакту вологого зерна з гігроскопічними речовинами (сульфат натрію, активоване вугілля, сухе зерно тощо). При цьому способі вологий матеріал змішують з поглиначем вологи і витримують протягом певного часу. Цей принцип використовують і при змішуванні вологого зерна з сухішим зерном тієї ж культури. При даному способі частина вологи переходить від більш вологого зерна до менш вологого, та вологість усієї зернової маси вирівнюється». [5]

«Механічне зневоднення – це спосіб видалення вільної вологи. У даному випадку вільна волога видаляється за рахунок сили тяжкості та відцентрової сили.

Другий спосіб видалення вологи зі зміною агрегатного стану – це теплове сушіння. Даний спосіб пов'язаний із витратами теплоти на зміну агрегатного стану води, перетворення її з рідкого стану на газоподібне». [6]

Залежно від того, як передається теплота об'єкту сушіння, розрізняють такі способи теплового сушіння: конвективний, кондуктивний (контактний), радіаційний, електричний (струмами високої частоти) та комбінований (рис. 1.1).

«У господарствах України найбільше застосування отримали зерносушарки, в яких здійснено конвективний спосіб сушіння». [1] «Даний спосіб сушіння використовується в найбільш поширених у сільському господарстві зерносушарках: шахтних, барабанних, сушарки періодичного та безперервно-періодичної дії (камерні, бункерні та бункерах активного вентилявання), а також в установках з киплячому шарі». [2, 3] «У деяких з них, крім процесу конвективного сушіння, має місце кондуктивний теплообмін (наприклад, від нагрітих поверхонь підводять короби у шахтних сушарках; від нагрітого рециркулюючого зерна до холодного в рециркуляційних сушарках), а також нетепловий та сорбційний». [4]

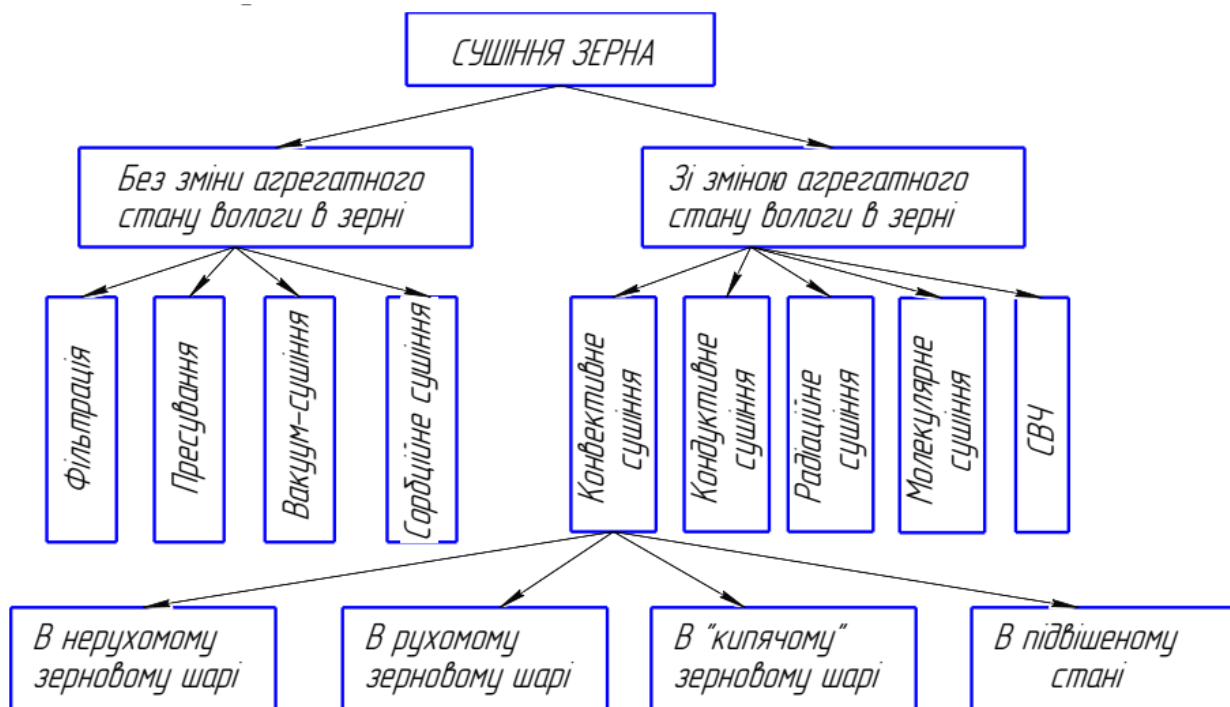


Рисунок 1.1 – Класифікація способів сушіння зерна

«Найбільш ефективно конвективне сушіння при примусовому продуванні агента сушіння через зерновий шар». [5] Від конструктивних та режимних параметрів процесу сушіння залежатиме стан шару зернового

матеріалу. Ширина зернового матеріалу є його сумарною характеристикою, від якої залежать усі інші характеристики зернового матеріалу: опір шару, активна поверхня, теплопровідність, вологопровідність, теплообмін, вологообмін та ін.

При радіаційному способі сушіння теплота до вологого матеріалу підводиться у вигляді променистої енергії. Радіаційне сушіння можна поділити на природне (сонячними променями) та штучне (інфрачервоними променями). Найбільш простий спосіб сушіння – природне радіаційне або сонячне сушіння. Однак можливості цього способу залежать від пори року, погодних та кліматичних умов.

«Сушіння, залежно від швидкості руху потоку агента сушіння і зернового шару, може здійснюватися в потоці: щільному нерухомому, щільному рухомому, псевдозрідженому («киплячому») та віброкиплячому». [6] Найменш ефективно сушіння в щільному нерухомому зерновому шарі, приклад якого – сушіння в бункерах, у металевих ємностях з перфорованим днищем. Таке сушіння характеризується великою нерівномірністю нагріву зерна та видаленням вологи. «Зерновий шар, що прилягає до місця входу агента, перегрівається та пересушується, а зернові шари, у міру віддалення від місця входу агента сушіння, не догріваються та не досушуються. Товщину шару при такому сушінні приймають рівною 600-1500 мм, значно рідше приймається товщина шару до 350 мм». [6]

При такому сушінні використовують дуже низьку температуру агента, щоб якимось чином знизити перегрів зерна. Використання низьких температур веде до значного збільшення часу сушіння, збільшення витрат палива та електроенергії.

Найбільшого поширення у зерносушильному обладнанні отримав щільний малорухливий зерновий шар. Під дією сил гравітації такий шар рухається зверху вниз шахтою сушарки. «Товщина зернового шару, що зіштовхується з сушильним агентом, постійно змінюється від 0 до 300 мм, що створює оптимальні умови, і для нагріву, і для сушіння. Агент сушіння обирається з температурою, що значно перевищує граничну температуру нагрівання зерна, яка складає 120-160 °С». [6-7] Тривалість нагріву зерна становить 15-20 хв. Сушіння зерна в щільному малорухливому шарі широко використовується в шахтних зерносушарках з підвідними та відвідними коробами та камерних зерносушарках безперервної дії.

«Особливість сушіння зерна в псевдозрідженому зерновому шарі полягає в інтенсивному теплообміні між зерном та агентом сушіння. При збільшенні температури агента сушіння швидкість сушіння зерна також різко зростає. При збільшенні її з 60 до 140 °С швидкість сушіння зерна зростає в 2,5

рази, а термін прогріву зерна скоротиться в 4 рази». [6-7] Таким чином, сушіння зерна в псевдозрідженому зерновому шарі найінтенсивніше, але його промислове використання ускладнене через відсутність надійного робочого органу.

Сушіння в падаючому зерновому шарі, знаходить все більше застосування та найбільше поширення.

Аналіз шляхів інтенсифікації процесу сушіння зерна (рис. 1.2) показує, що проведення заходів щодо інтенсифікації в галузі зовнішнього тепло- та вологообміну (тобто нагріву зерна та випаровування вологи з його поверхні) можливе на основі зміни стану зернового шару, що призведе до збільшення активної поверхні зерна.

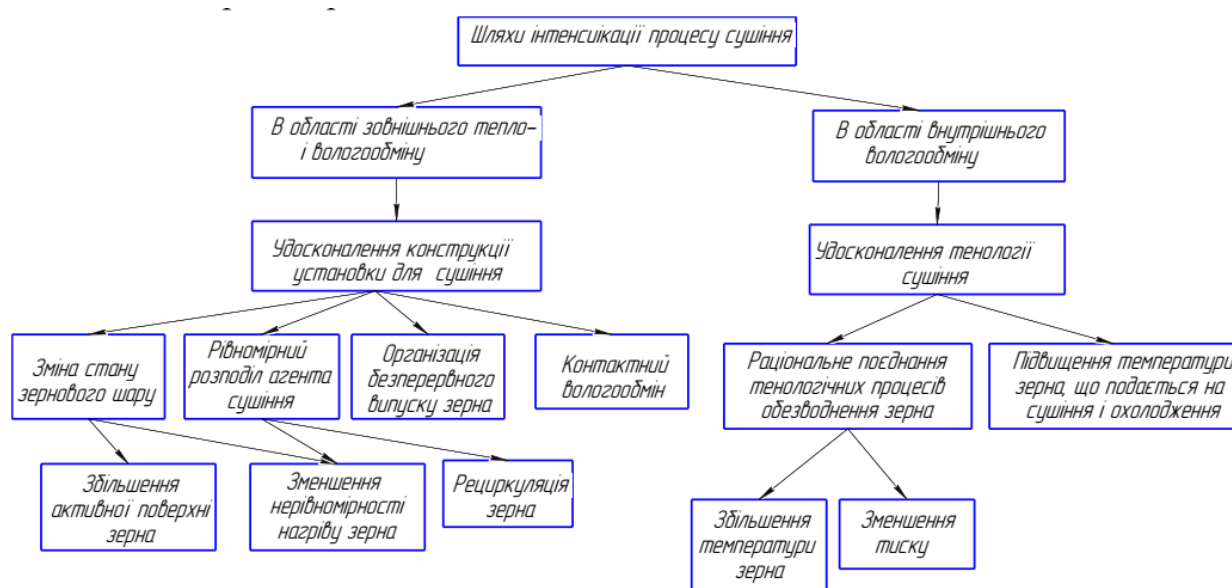


Рисунок 1. 2 – Класифікація шляхів інтенсифікації процесу сушіння зерна

Удосконалення технологічного процесу у зерносушінні має бути, перш за все, спрямовано на перехід до способів сушіння, що забезпечує рівномірність нагріву та сушіння зерна. Наявність нерівномірності нагріву (і перегріву) окремих зернових шарів найбільш характерні для сушіння в щільному нерухомому та щільному малорухливому шарі. Причому величина перегріву суттєво залежить від товщини зернового шару, температури агента сушіння, початкової та поточної температури нагріву зерна, а також від швидкості переміщення зерна (Непрямою характеристикою якої є тривалість періоду реверсивного продування зернового шару або агентом сушіння, або повітрям).

1.2. Класифікація конструкцій теплової обробки зерна

«Для теплової обробки зерна використовують різні типи установок, які можна класифікувати за різними ознаками. Наведемо класифікацію конструкцій установок зерна залежно від агрегатного стану матеріалу та характеристики зернового шару» [1]:

1. Сушіння зерна в щільному шарі:

а) сушіння в щільному нерухомому шарі:

- бункерні;
- підлогові;
- у силосах елеваторів;

б) сушіння в щільному рухомому шарі: конвеєрні (рис.1.1); стрічкові; шахтні (рис.1.2); жалюзійні (рис.1.3); бункерні (рис.1.4); баштові (рис.1.5).

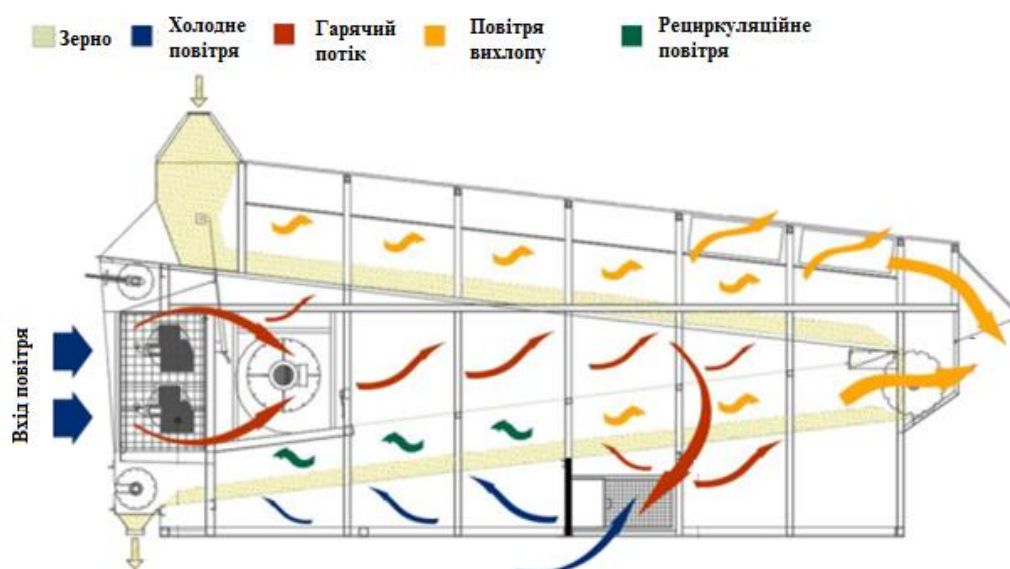


Рисунок 1.1 – Технологічний процес у конвеєрній зерносушарці [2, 3]

Перевагою будь-якої конвеєрної сушарки є можливість здійснювати сушіння зерна в тонкому шарі. Це дозволяє забезпечити рівномірність прогріву по всьому об'єму зерна, розташованого на конвеєрі. До особливостей конструкції даного типу сушарок можна віднести матеріал, який використовується для конвеєрів, систему повітророзподілу як гарячого теплоносія, так і повітря, що використовується для охолодження зерна. Існує як стаціонарне, так і мобільне виконання. Як теплоносієм може бути використано дизельне паливо або газ.

Даний тип зерносушарок виготовляють на великі продуктивності (до 50 т/год) з сушіння зерна кукурудзи та пізніх сортів соняшника. Проте запропоновані сучасні конструкції такого типу зерносушарок відрізняються

підвищеною енергоємністю за рахунок неефективного використання енергії теплоносія, недосконалої системи повітророзподілу та практично повної відсутності рекуперації.

«Шахтні зерносушарки (рис.1.2) є найбільш відомі. Свою назву вони отримали через сушильну конструкцію камери, виконаної у вигляді вертикальної шахти, по якій зерно рухається самопливом. Агент сушіння подається в сушильну камеру через короби, проходять поперек сушильної камери. Відпрацьований теплоносій піддається очищенню. Подальше його просування залежить від того, чи використовуються в конструкції зерносушарки елементи рекуперації. Саме на шахтних зерносушарках детально відпрацьовано технології інтенсифікації та зниження енергоємності процесів сушіння зерна за рахунок використання його рециркуляції, попереднього підігріву» [4-7].

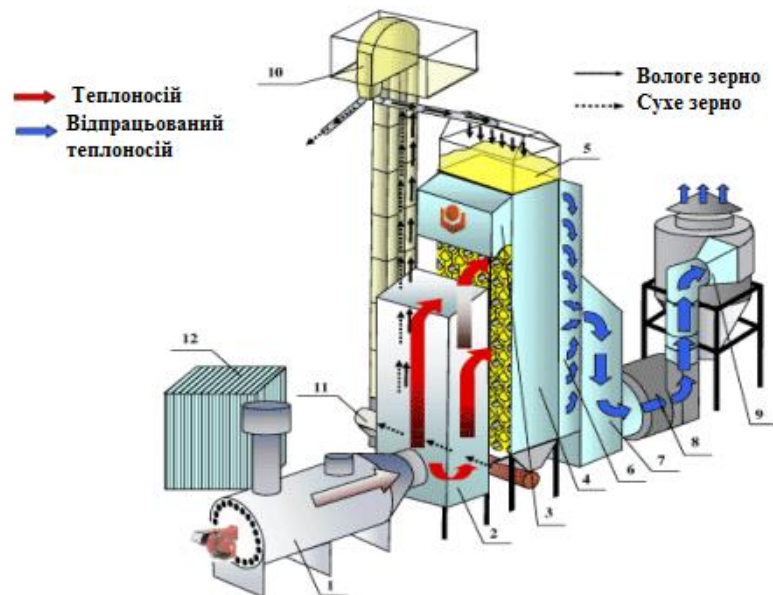


Рисунок 1.2 – Схема шахтної зерносушарки: 1 – теплогенератор; 2 – підвідний канал; 3 – канал підведення теплоносія; 4 – шахта; 5 – надсушильний бункер; 6 – канал відведення теплоносія; 7 – з'єднувальний канал; 8 – вентилятор; 9 – система аспірації; 10 – двопотокова норія; 11 – вивантажувальний гвинтовий конвеєр; 12 – робоче місце оператора

У конструкції багатьох зерносушарок переслідується одна з основної мети – забезпечити рівномірність розподілу теплоносія у зерновому шарі. Такі завдання покликана вирішувати жалюзійна зерносушарка (рис.1.3).

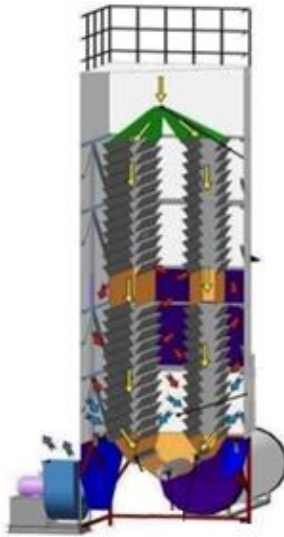


Рисунок 1.3 – Схема сушіння в жалюзійній (колонковій) зерносушарці.

Останнім часом широкого поширення набувають мобільні бункерні зерносушарки (рис.1.4). Конструкція сушильної камери забезпечує змінну товщину зернового шару висотою бункера. У верхніх шарах вона більша, у нижніх – менше, що дозволяє змінювати інтенсивність тепло- та волого обміну.

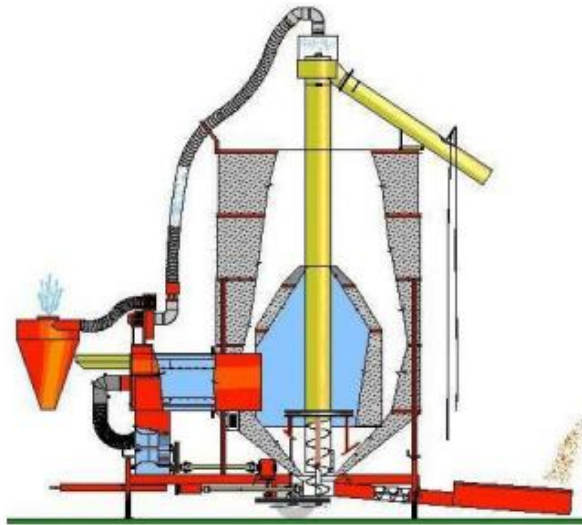


Рисунок 1.4 – Конструкція бункерної зерносушарки [9, 10]

Перемішування зерна в процесі сушіння може забезпечуватись його переміщенням з верхньої зони бункера до нижньої за допомогою вертикального шнека.

У баштових зерносушарках (рис.1.5) забезпечується сушіння кільцевого простору зернового шару. Конструкція забезпечує невелику нерівномірність сушіння за шаром зерна.

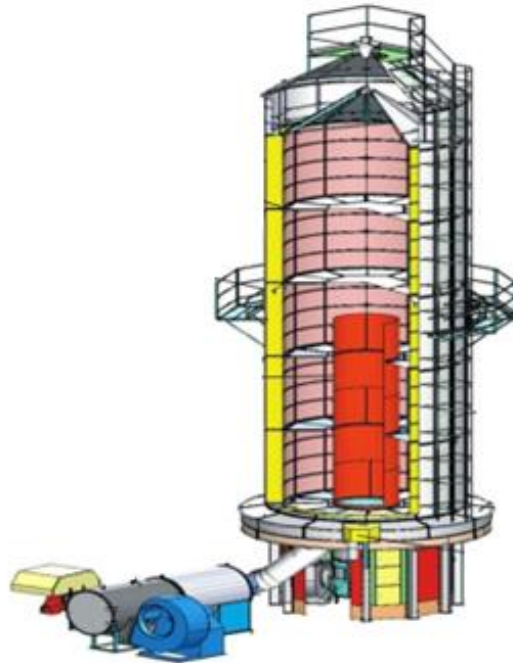


Рисунок 1.5 – Схема баштової зерносушарки

2. Сушіння в розпушеному шарі:

- барабанні (рис.1.6); шнекові (рис.1.7); каскадні; карусельні (рис.1.8); вібраційні (рис.1.9).

У барабанних зерносушарках, як правило, сушать фуражне зерно, оскільки не завжди вдається дотримати необхідний температурний режим.

Теплопередача здійснюється за рахунок теплоносія та нагрітих стінок барабана, що обертається. Барабан встановлений під кутом, що забезпечує переміщення зерна вздовж нього у зону розвантаження.

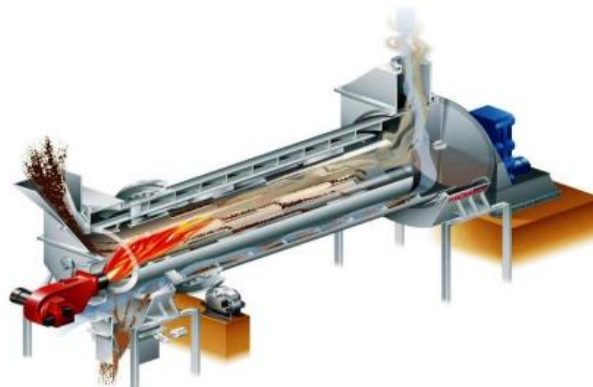


Рисунок 1.6 – Схема сушіння в барабанній зерносушарці.

У шнекових зерносушарках переміщення зерна здійснюється за допомогою шнека. У процесі переміщення зерно обдувають підігрітим повітрям.



Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд сушарки шнека

У карусельній зерносушарці (рис.1.8) на обертовій перфорованій поверхні утворюється шар зерна, через який продувають гаряче повітря. Обертання шару зерна забезпечує більш рівномірний розподіл агента сушіння і, відповідно, більш рівномірне висихання зернового шару.



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд карусельної зерносушарки.

Щоб забезпечити більш рівномірне обтікання агентом сушіння сухого матеріалу при його коливанні використовують вібраційні сушарки (рис.1.9). Як правило, для сушіння зерна вони не використовуються.



Рисунок 1.9 – Зовнішній вигляд вібраційної сушарки

Останнім часом на ринок заходять закордонні фірми, які займаються випуском мобільних зерносушарок бункерного типу з продуктивністю від 10 т/год. Мобільні зерносушарки повністю автоматизовані, що полегшує процес управління та контролю, а їхня робота має безперервний характер. «Дані

типи сушарок розраховані в основному для невеликих фермерських господарств з малими об'ємами виробництва зернових та дрібнонасіневих культур». [4, 6] «Конструктивними особливостями представлених мобільних бункерних сушарок є: зручність у конструкторському виконанні; зручність у пересуванні; мінімум витрат на конструктивні збори; мінімальна кількість людей задіяна при обслуговуванні; використання сітківки зовнішньої сітки сушарки з великим коефіцієнтом живого перерізу, що дозволяє краще продувати зерновий шар і видаляти вологу; використання досить великий за діаметром і меншою за висотою центральної камери подачі повітря». [4, 7]

Багато вчених та інженерів шукали шляхи вирішення проблеми вибору оптимальної конструкції та режимів сушіння з метою інтенсифікації процесу сушіння зерна та насіння. Розглянемо кілька варіантів сушіння зерна, найбільш ефективні на сьогоднішній день.

На рис.1.4 наведено «схему установки теплової обробки зерна (УТОЗ) з гравітаційним переміщенням зерна». [8]

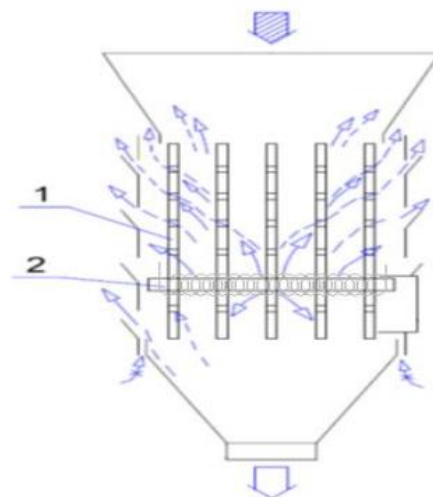


Рисунок 1.4 - Схема процесу теплової обробки зерна в УТОЗ: 1 – трубчастий електронагрівач (ТЕН); 2 – теплообмінник

Можливість використання контактного нагріву для теплової обробки зернових підтверджена низкою досліджень. Як нагріту поверхню можуть бути використані труби, що обігріваються парою, гарячою водою чи газом. Швидкість контактного сушіння залежить від температури нагріваючої поверхні та товщини зернового шару та контактну сушіння. Дану установку застосовують на борошномельних і круп'яних заводах, головним чином для підігріву зерна та невеликого зниження вологості при підготовці його до переробки або тривалого зберігання.

Основою конструкції УТОЗ є теплообмінний апарат з електричними джерелами теплопровідними реберними трубчастими електронагрівачами 1,

що з'єднані за допомогою нагрівальної панелі 2, мають широко розгалужену поверхню, що дозволяє суттєво збільшити тепловіддачу нагрівача.

Як основу теплообмінного апарату зерносушарки обрано ТЕН. Одним з багатьох переваг ТЕНів у порівнянні з іншими видами нагрівачів є надійний захист від ураження електричним струмом обслуговуючого персоналу за різних механічних впливів. Для нормального перебігу процесу теплової обробки (прогрівання, сушіння, прожарювання і т.д.) панель, що нагрівається, розташована біля основи установки повинна виконувати такі умови: рівномірне підведення тепла до максимально можливої поверхні певного об'єму, що піддається тепловій обробці, постійне відведення що утворилося на поверхні зерна вологи, перемішування зернового шару, щоб уникнути місцевого нагріву.

Необхідне тепло передається зерну теплопровідністю від електронагрівача через поверхню нагрівальної панелі теплообмінника.

Основним недоліком установки є режим теплової обробки, який встановлюється зі зміною потужності електронагрівача та тривалості контакту із нагрітою поверхнею теплообмінника.

Дещо відмінну характеристику має наступна установка з СВЧ нагріванням.

Надвисокочастотне нагрівання продукту, що утворюється в мікрохвильовій печі – це електромагнітні хвилі з частотою коливань, що варіюються від 300МГц до 30ГГц, тобто довжина хвилі варіюється від 1 мм до 1 м.

При СВЧ нагріванні, можна відмітити, що нагріваються полярні діелектрики, серед яких головним є вода. Під дією магнітного поля полярна молекула електричного поля вибудовується таким чином, що вектор диполя розташовується в протилежному напрямку по відношенню до вектора зовнішнього поля, напрям зовнішнього поля змінюється з досить високою частотою, тому полярна молекула за малий проміжок часу робить велику кількість оборотів, стикаючись при цьому з сусідніми молекулами. Все це призводить до підвищення кінетичної енергії та температури.

Іншою перевагою СВЧ сушіння є підвищена ефективність. Варто зазначити, що незалежно від методу продукту, що висушується, на випаровування кожної окремої молекули рідини витрачається певна кількість енергії. «Величина енергії, що витрачається досить велика, отже, весь процес висушування вимагає величезної кількості енергії. У мікрохвильовому сушінні не відбувається передачею тепла від джерела тепла, як, наприклад, при конвекційному сушінні, коли спочатку обігрівачем повітря, за допомогою нагрівача, а потім гаряче повітря передає тепло матеріалу». [9]

При цьому на кожному наступному етапі, від нагрівання повітря в сушарці та до передачі тепла продукту, втрачається певну кількість теплової енергії.

1.3. Принцип використання конвективного способу для нагрівання та сушіння зерна

Будь-яка установка для сушіння зерна повинна мати такі режими роботи, у яких досягається найбільша продуктивність, мінімальні енерговитрати, трудовитрати. При цьому необхідною умовою є дотримання технологічних та екологічних вимог.

«В даний час є достатня кількість теоретичного матеріалу з тепло- і масообмінних процесів з сушіння зерна». [5, 6]

Тому можна уточнити теорію теплової обробки зерна стосовно запропонованого контактного електротеплообмінника.

Наявна можливість використання контактної способу передачі теплоти для нагрівання зерна під час його теплової обробки підтверджена рядом досліджень. Так, контактний нагрів сировини застосовують на борошномельних і круп'яних заводах, головним чином, для підігріву зерна та зниження вологості для підготовки до зберігання та його подальшої переробки.

Як джерело теплоти для обігріву контактної поверхні теплової камери застосовують пар, гарячу воду, електроенергію, енергію, що утворюється при спалюванні газу та інших видів палива. Під контактною поверхнею ми маємо на увазі нагріту поверхню сушильної (теплової) камери, з якою зерновий шар знаходиться у безпосередньому контакті.

«Швидкість контактної способу теплопередачі залежить від температури нагрівання контактної поверхні, товщини оброблюваного зернового шару, а також часу контакту зерна з поверхнею, що гріє. Під час переробки невеликих партій зерна контактний спосіб теплопередачі можна використовувати набагато ширше і на найбільш досконалому енергетичному рівні». [7]

Забезпечення якості процесу теплової обробки, за дотримання експлуатаційних та технологічних вимог з мінімальними енерговитратами, ідеалізоване встановлення контактної типу для теплової обробки зерна повинні включати до свого структурного складу наступні основні елементи (рис. 1.5).

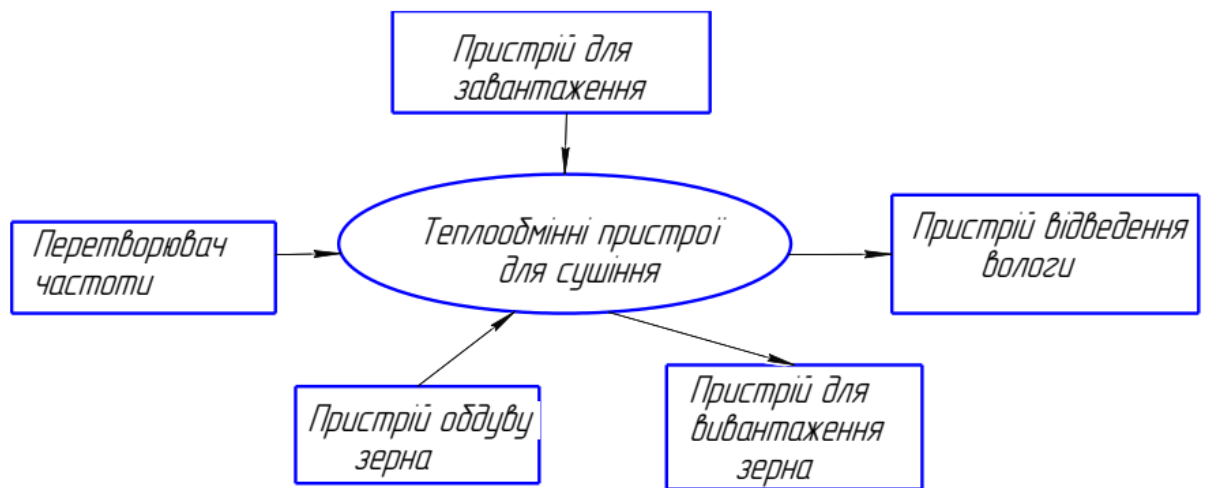


Рисунок 1.5 – Структурна схема контактної установки для теплової обробки зерна

Теплообмінний пристрій для сушіння зерна – це процес обробки, дотримання експлуатаційних, технологічних вимог до індукційним нагрівачам; він включають до свого структурного складу наступні основні елементи: теплообмінний пристрій 1 з пристроєм завантаження 2 та пристрій вивантаження зерна 3. У теплообмінному пристрої знаходяться нагрівальні елементи, виконані у вигляді електричної обмотки для індукційного нагріву. Кінці обмоток підключені до перетворювача частоти 4. Перетворювач частоти та пристрій обдування 5 підключено до теплообмінного пристрою. Виділена волога виводиться через пристрій відведення вологи 6. Висушене зерно пересувається до пристрою вивантаження зерна 3.

«Елементом конструкції контактної установки для теплової обробки зерна служить теплообмінний апарат з електричними джерелами теплоти та транспортуючим робочим органом для забезпечення безперервності процесу, а також рівномірного розподілу оброблюваного зерна по поверхні, що гріє при постійному перемішуванні зернового шару». [5, 7]

Виділимо певні вимоги для нормального перебігу процесів теплової обробки (сушіння, підсмажування, підігріву тощо).

Щодо контактного способу підведення теплоти ці вимоги полягають у наступному:

- рівномірне підведення теплоти до оброблюваного зерна;
- забезпечення максимально можливої площі контакту поверхні зерна, що піддається тепловій обробці;
- постійне відведення вологи, що виділяється із зерна (тобто постійне підведення сухого та відведення вологого агента сушіння);
- переміщення та одночасне перемішування зернового шару для уникнення локального перегріву зерен.

Основні біологічні особливості зерна визначають його максимальну (гранично-допустиму) температуру нагріву та максимально можливе разове вологознімання. Ці показники безпосередньо пов'язані з параметрами теплообмінника, що розробляється: температурою нагаріючої поверхні; її площею, що безпосередньо контактує з оброблюваним зерновим шаром; товщиною оброблюваного зернового шару тощо.

Окремо параметри тепловіддаючого елемента теплообмінника характеризують джерело теплоти та визначають його режимних показників: температуру, споживану потужність тощо. Крім того на процеси теплової обробки впливають параметри навколишнього середовища, такі, як температура і вологість повітря, атмосферний тиск та ін.

1.4. Висновки по розділу 1

Таким чином, створення та адаптація засобів механізації сушіння зерна до умов реального сільськогосподарського виробництва є важливою науково-технічною проблемою. Для ефективної роботи фермерських господарств необхідні мінізерносушарки, конструкція яких забезпечувала б необхідну якість готового продукту, порівняно невеликі витрати під час експлуатації, скорочення тривалості процесу сушіння та покращення якості готового продукту.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА

2.1. Обґрунтування контактного способу сушіння зерна

Математичний опис процесів, що відбувалися в зерні при різних способах теплової обробки, являє собою складний фізичний процес, який спрямований на обґрунтування конструктивної та технологічної частини установки для сушіння зерна.

У процесі сушіння зерна відбувається тепломасообмін між поверхнею зерна та навколишнім середовищем, а також переміщення теплоти та вологи усередині нього. Зовнішній вологообмін обумовлений перепадом парціального тиску пари біля поверхні зерна та в навколишньому середовищі.

«Переміщення вологи із внутрішніх шарів зерна до поверхні залежить від його структури та властивостей, що в свою чергу залежать від форм зв'язку вологи з зерном. Волога з внутрішніх шарів зазвичай переміщається до поверхні одночасно з потоком теплоти, що циркулює в тому ж, або частіше в зворотному напрямку». [8]

«Продуктивність сушильних установок розраховується їх здатністю нагрівати матеріал до температури висушування за умови повного відведення вологи». [6-7] Збільшення ємності призводить до підвищення продуктивності, проте значно здорожує установку.

«На теплопередачу, природно, впливає швидкість обертання сушарки, проте збільшення її не призводить до суттєвого покращення теплопередачі та разом з тим значно ускладнить конструкцію». [9]

Можливі шляхи інтенсифікації сушильних процесів можна встановити з аналізу рівнянь тепломасообміну:

$$Q = K_t \times F \times \Delta t \times \tau, \quad (2.1)$$

$$M = K_M \times \Delta c \times \tau. \quad (2.2)$$

де Q і M – кількість тепла та маси речовини, Дж та кг;

K_t і K_M – коефіцієнти теплопередачі і масопередачі, кВт/(м²*К);

F – поверхня контакту фаз, м²;

$\Delta c, \Delta t$ – різниця концентрації та температури;

τ – тривалість, с.

Для визначення витрат теплоти в установці, що розробляється встановимо вагу вологи, що видаляється.

Вага вологи m_v , випаровуваної із зерна, дорівнює різниці ваги зерна до сушіння – m_1 і після сушіння – m_2 :

$$m_B = m_1 - m_2, \quad (2.3)$$

Перетворивши рівняння (2.3), отримаємо вагу видаленої вологи:

$$m_B = m_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2}, \quad (2.4)$$

Витрата теплоти Q приймаємо пропорційній вазі випареної вологи,

$$Q = Km_B, \quad (2.5)$$

При сушінні продовольчого зерна в зерносушарках $K=4,5-5$ МДж/кг випареної вологи при зниженні вологості із 20 до 14%. При сушінні насінневого зерна більше в 2 рази.

У загальному випадку втрата теплоти, кДж/кг, на нагрівання зерна чи рівняння теплового балансу:

$$Q = \frac{GC}{m_B} (t_{32} - t_{31}), \quad (2.6)$$

де G – кількість зерна, що виходить із зони сушіння, кг/год; C – теплоємність зерна при виході із зони сушіння, кДж/(кг⁰С); m_B – вага випареної за 1 год вологи, кг/год; t_{31} , t_{32} – температура зерна, відповідно, до і після нагрівання, °С.

Теплоємність зерна при виході із зони сушіння:

$$C = \frac{(100 - \omega)C_c + \omega C_\omega}{100}, \quad (2.7)$$

де $C_c = 1,55$ Дж/(кг⁰С), $C_\omega = 4,19$ Дж/(кг⁰С) – відповідно, теплоємність сухої речовини зерна і води; ω – вологість зерна при виході із зони сушіння, %.

Кількісним фактором, що характеризує завдання перенесення маси, є критерій Біо (Bi), що характеризує співвідношення між інтенсивністю масообміну на поверхні твердого тіла та його масопровідністю:

$$Bi = \frac{K_B L}{K_\Pi}, \quad (2.8)$$

де K_B – коефіцієнт вологообміну, м/с; L – половина товщини матеріалу, м; K_Π – коефіцієнт потенціалопровідності речовини, м²/с.

При великих значеннях Bi ($Bi > 50$) задача є внутрішньою. При $Bi < 0,2$ – задача зовнішня. Для нерівності $0,2 < Bi < 50$ – змішана.

«Видалення вологи із зерна у вигляді пари буде залежатиме від кількості підведеної теплової енергії». [9] Також обґрунтовано, що «рушійна сила цього явища – це різниця температур». [9]

Кінетичний коефіцієнт явища – це коефіцієнт тепло-вологодіффузії або термоградієнтний коефіцієнт δ , що є зміною вмісту вологи при зміні різниці температур на градус. Для щільності потоку вологи та зміни вологовмісту під дією тепловологодіффузії виводимо рівняння:

$$\rho_{вп} = -K_\Pi \delta \rho_0 \nabla t, \quad (2.9)$$

$$\frac{dU}{dt} = K_{\text{п}} \delta \nabla^2 t. \quad (2.10)$$

$\rho_{\text{вп}}$ – густина потоку вологи у вигляді рідини і пари в ізометричних умовах, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; ρ_0 – густина абсолютно сухого матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$; ∇ - оператор Лапласа, м^{-1} ; t – температура, $^{\circ}\text{C}$; δ – коефіцієнт термовологопровідності, кг вологи / $(\text{кг}$ сухої речовини $\cdot ^{\circ}\text{C})$; U – вологовміст, $\text{кг}/\text{кг}$; τ – тривалість, с .

З формул (2.9) та (2.10) випливає, що теплові характеристики процесу сушіння визначають характер перебігу даних процесів. Крім того, теплі масообміні процеси при сушінні взаємопов'язані, а процес теплообміну є визначальним при масообміні. Тому при контактному зерносушінні необхідно визначити закономірності перебігу процесів теплообміну та теплопередачі, при яких теплові характеристики установки повністю забезпечували б дотримання технологічних вимог.

Розробка та створення зерносушильної установки, що використовує на основі своєї роботи теплові процеси проходять за загальною схемою. На першому етапі визначають технологічні вимоги до встановлення, де видно характер протікання біохімічних та теплофізичних процесів, що протікають у зерновій масі. «За численними науковими дослідженням інших авторів під час експлуатації різних зерносушильних установок на цей час розроблено основи технології сушіння зерна, вивчені біохімічні та теплофізичні показники як одиничного зерна, і зернової маси». [9]

2.2. Обґрунтування параметрів та режимів роботи сушильної установки

Всередині циліндричного кожуха знаходиться нерухома гвинтова поверхня, на яку з верхньої частини засипається зерно з бункера, (рис. 2.1).

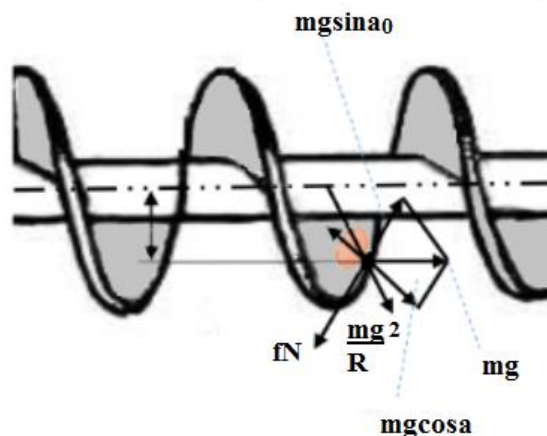


Рисунок 2.1 – Схема гвинтового руху зерна

«Гвинт шнека виконаний з труби, до якої приварені гвинтові спіралі поверхні». [6, 7, 10] Як опори застосовують втулки. Кожух шнека виготовлений із листової сталі товщиною 1,0 мм.

Ширина витка або ширина спіралі визначається за формулою:

$$b = \frac{D-d}{2}, \quad (2.11)$$

де D – зовнішній діаметр шнека, мм; d – діаметр валу гвинта, мм.

$$l = \sqrt{\pi^2 D^2 + \vartheta^2}, \quad (2.12)$$

де l – довжина гвинтової лінії по зовнішньому діаметру шнека в межах кроку ϑ , мм; ϑ – крок гвинта, мм.

«На поверхню шнека діють наступні сили: сила тяжіння зерна, $G = mg$, сила тертя mv^2/R_0 поверхня витка і кожуха шнека». [10]

Швидкість зерна, що переміщується по гвинтовому спуску, під дією сили тяжіння $G = mg$, сили тертя $\frac{mv^2}{R}$ об поверхню витка і кожух шнека визначаємо із рівняння:

$$mgsina = Kmgcosa + K \frac{mv^2}{R}, \quad (2.13)$$

Звідки

$$v = \sqrt{gR \frac{sina - Kcosa}{K}}, \quad (2.14)$$

де R – радіус шнека, м; a – кут підйому спіралі гвинтового спуску (шнека); K – коефіцієнт тертя зерна об поверхню шнека.

Рух сипучого вантажу трубами супроводжується опором від тертя зерна об стінки, від тертя частинок зерна між собою та повітряного середовища. Опір повітряного середовища досягає помітної величини при транспортування зерна трубами, розташованими під кутом не більше 50° .

З наведеної залежності (рис. 2.2) видно, що за порівняно високої температури сушильного агента ($50-55^\circ\text{C}$), характерною для більшості промислових зерносушарок, нагрівання одиничних зерен дуже інтенсивний. Вже за 30-35 с температура зерна досягає $47-53^\circ\text{C}$. При такому інтенсивному нагріванні зерна волога з його поверхні та з оболонок швидко випаровується і зона випаровування збільшується всередину зерна. Швидкість сушіння на такому короткому проміжку часу практично постійна.

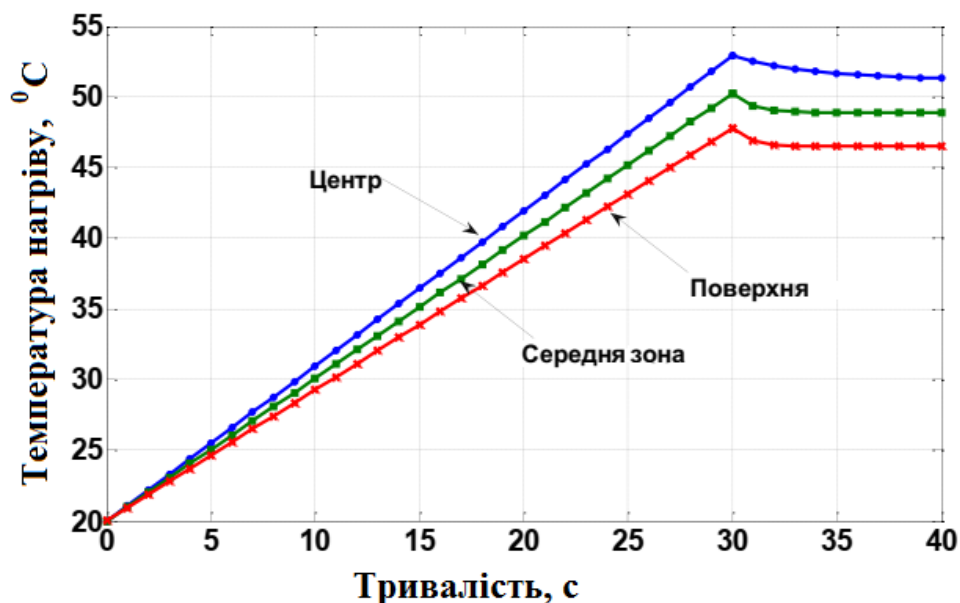


Рисунок 2.2 - Результат моделювання процесу нагріву зерна

«При проведенні досліджень показало, що стійке проходження в трубах досягається при незв'язаному русі, при якому швидкість сипучого матеріалу залежить від висоти шару». [10, 11] Тому рекомендується встановити кут нахилу витків самопливних труб більшим, ніж кут внутрішнього тертя транспортуючого матеріалу. Практично рекомендується для зерна $\alpha=22\dots30^\circ$, за підвищеної вологості 30^0 .

Швидкість руху зерна зазвичай становить 2,5-3,0 м/с, кут підйому на периферії 40^0 .

Звідси, задавшись швидкістю та визначивши α , знаходимо крок гвинтовий лінії.

$$S = 2\pi R_0 \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.15)$$

Кут підйому спіралі гвинтового спуску повинен бути більшим за кут тертя зерна поверхнею спуску, тобто $\alpha_0 > \varphi$. Гвинтова поверхня повинна мати змінний крок, що зменшується від верхньої частини до нижньої. Це викликано тим, що з висушування зерна знижується коефіцієнт тертя зерна з матеріалом гвинтової поверхні шнека.

«При сушінні волога в зерні нагрівається і випаровується, за рахунок цього знижується вологість зерна і пропорційно цьому знижується коефіцієнт тертя». [12] Коли коефіцієнт тертя досягне величини більше tg кут нахилу, зерно знову починає рухатись вниз. Швидкість руху зерна у вертикальній площині не повинна бути дуже малою, (рис. 2.3), так-як в іншому випадку відбувається перегрів зерна (через закипання води у зернівці).

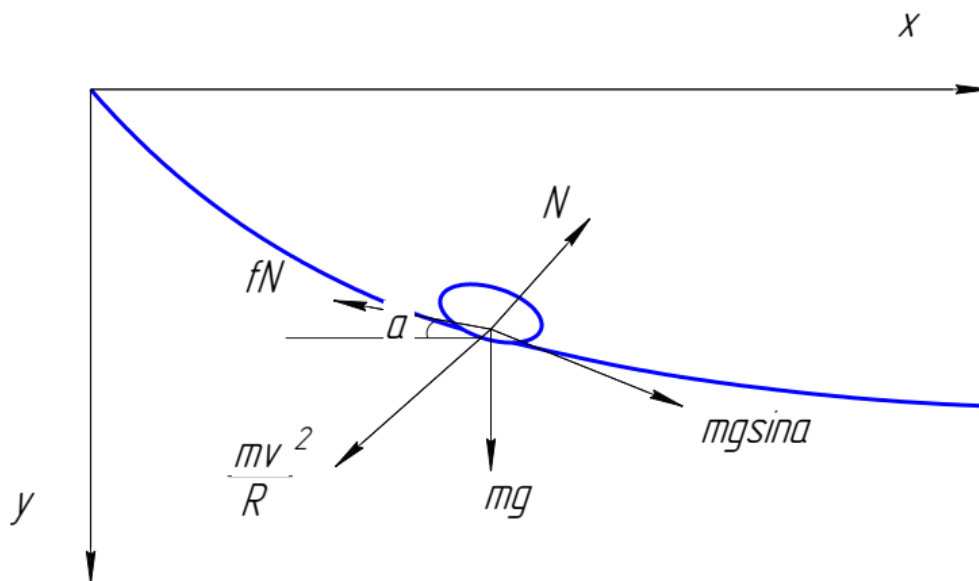


Рисунок 2.3 – Сили, що діють на зерно, що рухається по гвинту шнека

За таких умов є просторовим рухом зерна, коли виникає відцентрова сила, що притискає зерно до стінки кожуха, можна знехтувати.

Задаємося умовою сталості швидкості руху зерна по гвинтовій лінії, тобто.

$$V = V_0 = const, \quad (2.17)$$

де V_0 – початкова швидкість зерна.

Рівняння руху зерна вздовж вісі X по дотичній до спіралі шнека:

$$m \frac{d^2x}{dx^2} = F_1 - F_2 + G \cos \alpha, \quad (2.18)$$

де m – вага зерна, кг; F_1 – сила тертя зерна об виток спіралі, Н; F_2 – сила тертя зерна об внутрішню стінку каналу, Н; N – реакція поверхні спіралі від дії сили тяжіння, Н; α – кут нахилу вісі X до вертикалі, град., $\alpha = (90 - \beta)$, де β – кут нахилу гвинтової лінії спіралі, град.

Сила тертя визначається з наступних формул:

$$\begin{cases} F_1 = fN = fG \sin \alpha \\ F_2 = fm\omega^2 r \end{cases}, \quad (2.19)$$

де f – коефіцієнт тертя руху зерна по спіралі; ω – кутова швидкість зерна, s^{-1} ; r – відстань від вісі обертання спіралі до центра маси зерна, м.

Враховуючи F_1 і F_2 вираз (2.12) матиме вигляд:

$$m \frac{d^2x}{dx^2} = fG \sin \alpha - fm\omega^2 r + G \cos \alpha, \quad (2.20)$$

Швидкість руху зерна, м/с, вздовж гвинтової лінії шнека:

$$v = \int_0^t (fG \sin \alpha - fm\omega^2 r + G \cos \alpha) dt \quad (2.21)$$

Проінтегрувавши, з урахуванням початкових умов (при $t = 0$), отримаємо:

$$v = fG\sin\alpha - fm\omega^2r + G\cos\alpha)t + v_0 \quad (2.22)$$

де t – тривалість від початку процесу переміщення зерна, с; v , v_0 – швидкості зерна вздовж гвинтової лінії відповідно в початковому та поточному моменті часу, м/с.

Поверхня, що характеризує кутову швидкість залежно від тривалості при різних кутах, показана на рис. 2.4.

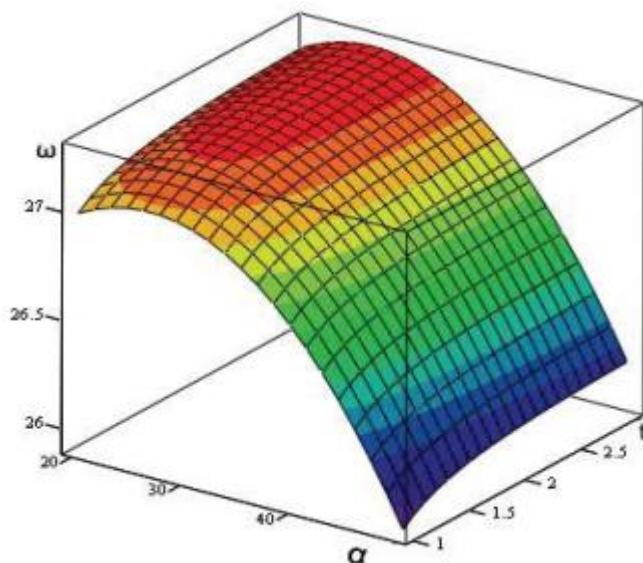


Рисунок 2.4 – Залежність кутової швидкості зернівки від кута α і тривалості t .

З рис. 2.4 видно, що кутова швидкість зернівки значно збільшується зі зростанням кута α і зменшується – від тривалості переміщення. Отримані залежності можна використовувати при розробці та проектування спірально-гвинтових апаратів.

Обґрунтування теплофізичних параметрів установки

До обґрунтування теплофізичних параметрів установки, крім температури поверхні теплообмінника, можна віднести і характер розподілу температури за об'ємом зернової маси, що знаходиться в контакті з нагрівальною поверхнею, так-як дана величина обмежується технологічними умовами.

При використанні контактного способу результатом аналізу робочого режиму має бути визначення температури зерна через певну тривалість часу контакту з нагрітою поверхнею теплообмінника, а також характер розподіл температури зерна по довжині теплообмінника.

«Теоретичний розгляд роботи контактної зерносушарки на початковому етапі може базуватися на теорії роботи теплообмінних апаратів, що наочно демонструє різні режими функціонування теплообмінників». [11]

У нашому випадку процес теплопередачі протікатиме наступним чином. У горизонтально розташованому циліндричному теплообміннику, нагрітий за допомогою перетворювача частоти до температури t_{T1} надходить зерно, з початковою температурою t_{31} . «По органу-шнеку сушильної установки, що транспортує, зерно переміщується та нагрівається за рахунок контакту з поверхнею теплообмінника до температури t_{32} , що прагне температурі поверхні теплообмінника, яка у свою чергу, за рахунок контакту з холоднішою масою зерна досягає температури t_{T2} , причому $t_{T2} > t_{32}$. У процесі сушіння теплопередача від гарячої поверхні до зерна протікає безперервно, а кінцева температура зерна не перевищує температуру теплообмінника, і за основу розрахунку можна прийняти порядок і особливості розрахунку прямого рекуперативного теплообмінника». [12]

Фізична сутність контактного електричного нагріву полягає в тому, що електричний струм, проходячи по провіднику, нагріває його.

Кількість теплоти, Дж, що виділяється в провіднику:

$$Q = I^2 R t = I^2 \rho L t / S, \quad (2.23)$$

де I – сила струму, А; R – опір провідника, Ом; t – тривалість нагріву; ρ – питомий опір матеріалу провідника, (Ом*мм²)/м; L – довжина провідника, м; S – поперечний перетин провідника, мм².

Звичайний питомий опір матеріалів визначають при температурі 20⁰С і визначають за наступною формулою:

$$\rho_t = \rho_{20}(1 + a(t + 20)), \quad (2.24)$$

де ρ_{20} – питомий опір при 20⁰С; a – температурний коефіцієнт.

Теоретична кількість теплоти, Дж, необхідна для нагріву матеріалу при визначеному перепаді температури, пропорційне масі матеріалу і його теплоємності:

$$Q = m_1 C (t_k - t_m), \quad (2.25)$$

Необхідна потужність електронагрівача, кВт:

$$P = \frac{Q}{3,6 \times 10^3 t \phi_T}, \quad (2.26)$$

де t – тривалість нагріву, с; ϕ_T – термічний коефіцієнт корисної дії установки (для теплоізольованої $\phi_T = 0,9 \dots 0,95$).

За розрахунками процесу тепломасообміну в сушильній установці необхідно обов'язково прийняти:

- зерновий матеріал розглядається як однорідне текуче середовище з теплофізичними характеристиками;

- площа поверхні теплообміну визначається як:

$$F_n = F_\Sigma - F_k, \quad (2.27)$$

де F_Σ - загальна площа теплообміну, m^2 ; F_k - площа контакту із зерном, m^2 .

- об'єм зерна, що знаходиться в сушильній установці V_z має площу поверхні, яка визначається за формулою:

$$F_{zp} = F_k - F_{nz}, \quad (2.28)$$

де F_{nz} - площа поверхні зерна, через яку здійснюється волого відвід, m^2 .

- теплота підводиться до всієї поверхні теплообмінника постійно та рівномірно;

- теплоємність зерна в процесі сушіння $C_z = \text{const}$.

Коефіцієнт теплопередачі визначається як:

$$K = \frac{1}{\frac{F_n}{aF_{zp}} + \frac{\delta}{\lambda_{zp}} + \frac{1}{a_{zp}}}, \quad (2.29)$$

Спрощуючи вираз (2.25), отримаємо:

$$K = \frac{\lambda_{zp}}{\delta}, \quad (2.30)$$

де λ_{zp} - коефіцієнт теплопровідності зерна, $Вт/(м*К)$; δ - товщина зернового шару.

Виходячи із зміни площі контакту, пропорційно буде змінена довжина теплообмінника, тоді рівномірне та постійне підведення теплоти поверхні теплообмінника буде рівносильне зменшенню водяного еквівалента на певну величину, яка визначається дослідним шляхом.

З вищевказаного випливає, що температура зерна t_{z2} на виході з теплообмінника за формулою (2.25) буде визначатись за наступною формулою:

$$t_{zp2} = t_{T2} - (t_{T1} - t_{zp1}) e^{-\left(\frac{1}{C_n} + \frac{1}{G_{zp}C_z}\right) \frac{V\lambda_{zp}L^2}{\delta}}, \quad (2.31)$$

де V - коефіцієнт, що залежить від характеру підведення теплоти до поверхні теплообмінника.

З рівняння (2.31) маємо, що температура зерна на виході з сушильної установки залежить від теплофізичних характеристик зерна (λ_{zp} , C_z), теплофізичних та геометричних характеристик теплообміннику (C_n , L , δ), а також від характеру підведення теплоти до поверхні теплообмінника, який можна враховувати коефіцієнтом V .

Аналізуючи отримане рівняння (2.31), можна сказати, що температура зерна, що проходить через теплообмінник, досягає температури поверхні теплообмінника та на виході має його максимальне значення. Ці значення

змінюються залежно від величини витрати зерна ($G_{зр}$) та довжини теплообмінника (L), а також товщини шару.

Після цього градієнт температури зерна знижується із збільшенням довжини теплообмінника, тобто є можливість визначити довжину теплообмінника, подальше збільшення якого призводить до незначного збільшення швидкості нагріву, що, у свою чергу, веде до зниження продуктивності установки. Ця довжина залежить від виду обробки, виду зерна та його стану.

«Зменшення товщини зернового шару δ веде до збільшення значення коефіцієнта теплопередачі K , внаслідок зменшення значення температурного тиску по довжині теплообмінника». [12]

Задаючи параметри теплообмінника (L , δ , t_n) можна досягти відповідності температури оброблюваного зерна до допустимого значення. Як було зазначено вище, будь-який тепловий вплив на зерно (сушіння, термічне знезараження, обсмажування тощо) призводить до зміни його якісного складу. Крім того, зміна вмісту вологи в зерні в процесі теплової обробки позначаються на його фізико-хімічних властивостях і термодинамічних характеристика стану, а через них і на технологічні властивості зерна. Не менше значення має також зміна у процесі теплового впливу температури нагрівання. Так, внаслідок збільшення температури нагріву змінюється стан поглиненої тканинами зерна вологи, ступінь її «пов'язаності». Тому при тепловому впливі на зерно важливо забезпечити збереження його життєдіяльності, яка проявляється при вмісті вологи в зерні та температурних умовах близьких до ідеальних.

2.3. Висновки по розділу 2

Аналіз сучасних технологічних способів сушіння зерна та специфічних особливостей застосування контактного нагріву показав, що, незважаючи на численні результати, є необхідність проведення комплексних досліджень із розробкою фізичних та математичних моделей, що дозволяють якісно та кількісно оцінювати ефективність впливу та дасть можливість прогнозувати очікуваний результат і підвищити надійність технологічного процесу.

РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНА

3.1. Опис установки для сушіння зерна

Процеси теплової обробки зерна в теплообміннику характеризуються сукупністю різних чинників, кожен із яких безпосередньо чи опосередковано впливає на ефективність використання установки для сушіння зерна. За теоретичним описом взаємозв'язку параметрів маємо уявлення про характер перебігу процесу теплової обробки на зерносушарці, що наочно розкриває характер і степінь впливу взаємодії основних параметрів, які визначають ефективність процесу сушіння.

На рис. 3.1. наведена схема установки для сушіння зерна.

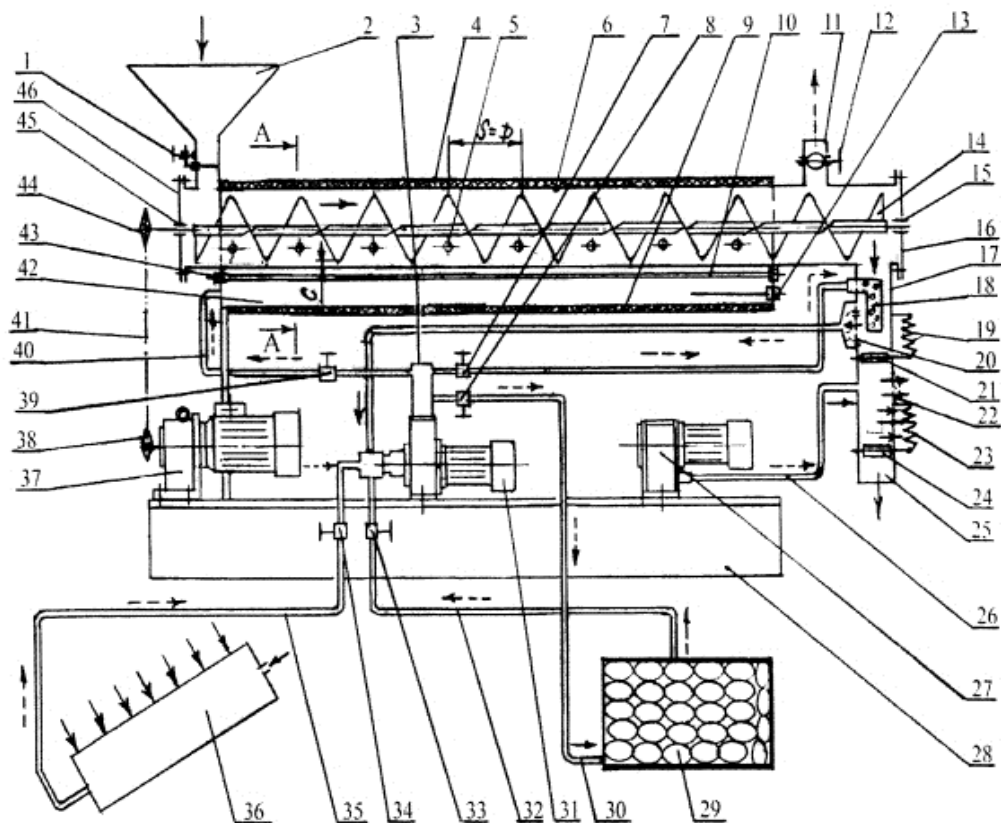


Рисунок 3.1. Загальний вигляд установки для сушіння зерна:

Пристрій для сушіння зерна складається з регульованої заслінки 1, встановленої на днищі завантажувального бункера 2, вертикально встановленого на горизонтально розташованому циліндричному кожусі 6, закритому з торцевих сторін кришками 16, 46 і покритому зверху шаром теплоізолюючого матеріалу 4.

У кожусі розміщений робочий орган, що транспортує, 14, виконаний у вигляді шнека, вал якого встановлений в корпусах підшипників 15, 45, співвісно закріплених на кришках кожуха. У кінцевій частині кожуха вертикально встановлений патрубковий 11 з регульованою заслінкою 12 для видалення вологого повітря, а навпроти в нижній частині кожуха під вивантажним вікном розташована камера 17 для сушіння, у внутрішній частині якої зверху вниз встановлений перфорований повітропровід теплоносія з заглибленням частини камери для сушіння встановлений вантажний клапан 21 з регулюючою пружиною 19, а для рециркуляції відпрацьованого теплоносія стінка камери 20 сушіння 17 перфорована.

Атмосферне повітря подається в камеру охолодження 25 за допомогою повітропроводу 26 від компресора 27, при цьому камера охолодження 25 має на виході вантажний клапан 24 з пружиною 23 і перфоровану стінку 22 для видалення атмосферного повітря. Циркуляція теплоносія, підготовленого використанням теплового акумулятора 29 і сонячного повітряного колектора 36, здійснюється відцентровим вентилятором 31, що має розподільний короб 3 з нагнітальної сторони, по повітропроводах 30, 32, 35, 40. Встановлені на повітропроводах 34 та 39 дозволяють здійснювати вибір циркуляційного контуру теплоносія. Транспортуючий робочий орган 14 отримує обертальний рух від електродвигуна з редуктором 37 за допомогою ланцюгової передачі 41, насадженої на провідну 38 і 44 провідну зірочки. Кожух 6 з транспортуючим робочим органом 14, компресором 27, вентилятором 31 та електродвигуном з редуктором 37 розміщені на рамі 28.

Камера 42 розташована під кожухом 6, нижня та бічні стінки якої покриті шаром теплоізоляційного матеріалу 9. У камері розміщені електричні термонагрівальні елементи 10, сполучні кінці 43 яких виведені за межі камери 42 і терморегулятора 13.

Бічні поверхні кожуха 6 нижче осьової лінії по горизонталі мають отвори 5 для надходження теплоносія з камери 42 у внутрішню порожнину кожуха 6. Відстань між внутрішньою поверхнею кожуха 6 і витками шнека 14 не перевищує мінімальних геометричних розмірів зерен різних культур під.

Пристрій працює наступним чином. Включаються нагрівальні елементи 10 і вентилятор 31, який забезпечує циркуляцію теплоносія (атмосферного повітря), в залежності від кліматичних умов надходить з сонячного колектора 36 або зарядженого теплового акумулятора 29 в камеру 42, що знаходиться під кожухом 6, а після досягнення для проведення кондуктивного способу сушіння зерно подається в завантажувальний бункер 2, звідки воно через відкриту регульовану заслінку 1 надходить у робочу зону

включеного транспортуючого робочого органу 14, безпосередньо контактуючи з нагрітою поверхнею кожуха 6, переміщається до входу камери для контактного сушіння 1 циркулюючим у кожусі теплоносієм і видаляються через патрубок 11, що має регульовану заслінку 12. Нагріте і підсушене зерно певного об'єму наповнює камеру контактної сушарки 17, де за допомогою перфорованого повітроводу з заглушеним кінцем 18 продувається теплоносієм акумулятором 29, здійснює контактний спосіб сушіння. Після досягнення певної заданої маси зерна в камері контактного сушіння 17 19 пружина вантажного клапана розтягується, відкриваючи вантажний клапан 21, і висушене зерно надходить в камеру охолодження 25.

Відпрацьований теплоносій через перфоровану стінку камери сушарки 20 з метою рециркуляції для використання остаточної теплоти теплоносія на вхід відцентрового вентилятора 31. В камері охолодження 25 висушене зерно охолоджується атмосферним повітрям, що нагнітається компресором 27, а відпрацьоване повітря видаляється через перфоровану стінку 22 камери охолодження.

При досягненні певної заданої маси зерна в камері охолодження 25 пружина 23 спрацьовує на розтягування, відкриваючи при цьому вантажний клапан 24, і висушене зерно, видаляється з пристрою. Для сушіння зерна різних культур пристрій дозволяє змінювати температуру нагрівання кожуха, використовуючи терморегулятор 13, а також змінювати частоту обертання валу робочого органу 14.

Запірно-регулюючі клапани 7, 8, 33, 34, 39 дозволяють здійснювати в залежності від кліматичних умов нижченаведені режими роботи постачання теплової енергією пристрою для сушіння зерна: 1 – постачання теплової енергії за рахунок електричних нагрівальних елементів 10, а також частково теплоносієм, підготовленим сонячного повітряного колектора 36; 2 – постачання теплової енергії тільки за рахунок теплоносія, підготовленого використанням сонячного повітряного колектора 36; 3 – постачання теплової енергії за рахунок електричних нагрівальних елементів 10, а також частково теплоносієм, підготовленим використанням теплового акумулятора 29; 4 – постачання теплової енергії тільки за рахунок електричних нагрівальних елементів 10.

В сушильній установці передбачена можливість заряджання теплового акумулятора 29 тепловою енергією за рахунок теплоносія, підготовленого в сонячному колекторі повітря 36, а також проведення процесу активного вентилявання зерна.

Зниження енергоємності процесу сушіння зерна та збільшення її ефективності відбувається за рахунок можливості застосування у пристрої

кондуктивного та конвективного способів сушіння, підготовки теплоносія шляхом використання повітряного сонячного колектора 36 та теплового акумулятора 29 та рециркуляцією відпрацьованого теплоносія.

Пристрій може застосовуватися для сушіння зерна та насіннєвого матеріалу як у складі технологічної лінії з переробки зерна перед закладкою на зберігання, так і автономно.

3.2. Методика визначення температури зерна в установці для сушіння зерна

Для збереження якості зібраного зерна необхідно забезпечити, можливо, швидке видалення вологи, після чого зерно стає придатним до тривалого зберігання. Цього можна досягти завдяки «застосування високих швидкостей сушіння, які значною мірою залежать від температури сушіння». [4, 8] Температуру дослідного зразка зерна можна виміряти за допомогою термометра чи пірометра.

Можливості підвищення температури обмежені такими факторами:

- втратою схожості;
- змінами в окремих складових частинах зерна;
- порушенням біологічної структури;
- зміною якісних показників.

При сушінні діє правило: температура зерна має бути тим нижча, чим вища його вологість і триваліший термічний вплив.

Вимірювання температури як досліджуваного зерна, так і поверхні, що нагрівається, можна виміряти за допомогою пірометра. Дія пірометра оснований на вловлюванні інфрачервоного (ІЧ) випромінювання, що випускається об'єктом, інтенсивність якого пропорційна температурі об'єкта.

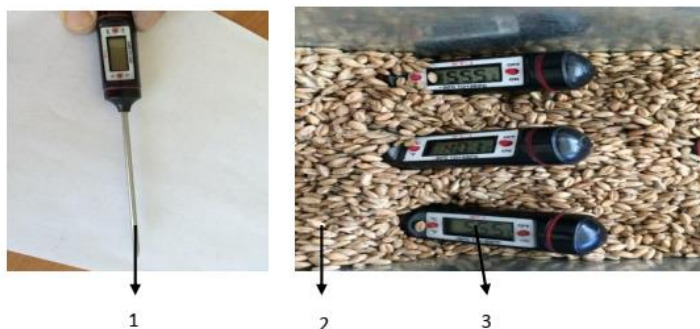
Важливим фактором, що обмежує режими сушіння зерна в зерносушарках різних типів та конструкцій, служить гранично допустима температура нагріву зерна.

Граничнодопустима температура нагріву зерна, за якої можлива реалізація процесу впливу без зниження якості обробленого продукту, в основному залежить від його початкової вологості, оскільки чим більше в об'єктах теплового впливу вільної вологи, тим вони менш термостійкі.

Датчики температури показують значення $t_1=55,5^{\circ}\text{C}$ у першій стінці, що обігрівається, $t_2=40,0^{\circ}\text{C}$ між стінами установки, що обігріваються, $t_3=55,4^{\circ}\text{C}$ біля другої стіни, що обігрівається.

Тому при вологості зерна, яке піддається сушінню більше 20% знижують температуру агента сушіння, що подається, і температуру

нагрівання. У разі перевищення початкової вологості зерна 25%, граничнодопустимі температури нагріву зерна та агента сушіння становлять 50% і вище.



Зниження температури призводить до зменшення випаровування (знімання вологи).

3.3. Методика теплофізичних змін зерна

Теплофізичні характеристики будь-якого матеріалу, у тому числі зерна, необхідні при розрахунках теплових процесів нагріву, сушіння, охолодження. Особливістю теплофізичних характеристик зерна є їхня залежність від вологості, температури, від розміру зерен, від щільності зернового шару.

«Щодо методики процесу теплової обробки розглянемо наступні теплофізичні властивості зерна». [9, 12]

До теплопровідності зернової маси можна віднести здатність передавати теплоту при безпосередньому зіткненні зерна один з іншому, або від поверхні, що нагрівається. Оцінюють теплопровідність зерна та зернового шару коефіцієнтом теплопровідності, який змінюється в межах 0,120...0,140 Вт/(м·°С).

Температуропровідність – це теплофізична величина, що характеризує швидкість зміни температури у матеріалі, та оцінюється коефіцієнтом температуропровідності $1,7 \cdot 10^{-7} \dots 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$.

За відомими значеннями теплопровідності та температуропровідності визначався коефіцієнт питомої теплоємності:

$$C = \frac{\lambda}{V\rho}, \quad (3.1)$$

Дослідження проводилось в заданих межах варіювання факторами: температура нагріву від 45-55⁰С, тривалість нагріву від 12 до 24 хв., товщина шару 5-15 см. Досліди проводились в триразовій повторюваності.

У межах зміни значень коефіцієнтів температуропровідності (В), теплопровідності (λ) та теплоємності (с), для зерна пшениці отримані

відповідні математичні залежності від часу нагрівання (t), температури нагрівання (τ) та товщини шару (h).

Теплофізичні коефіцієнти зерна представлені у вигляді залежностей часу нагріву, температури та товщини шару (рис. 3.1.-3.3).

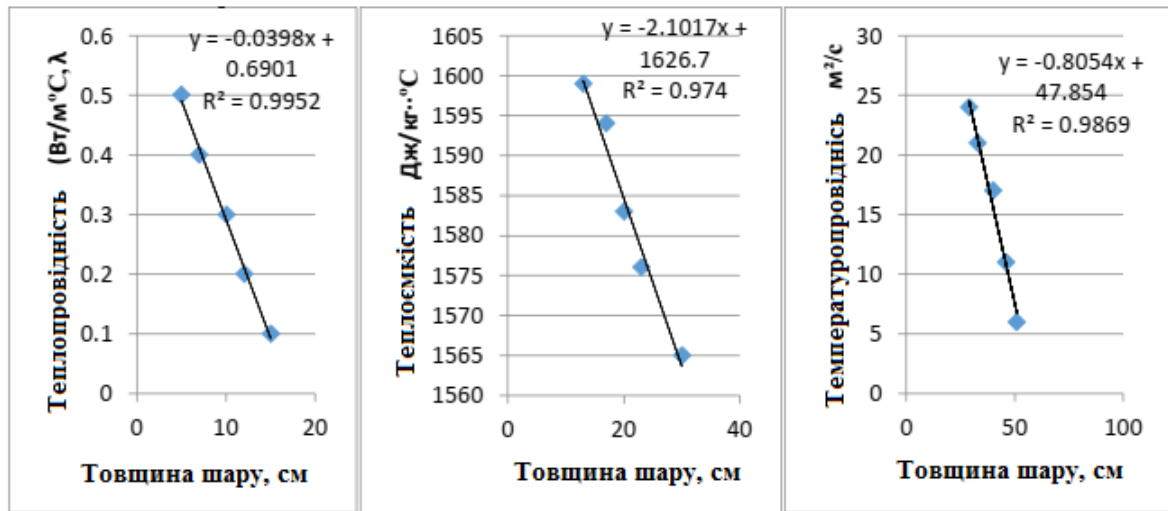


Рисунок 3.1 - Вплив товщини шару зерна на теплофізичні характеристики

Закономірності зміни констант, що розглядаються, від товщини шару зерна показали, що залежності підпорядковуються лінійному закону, в кінцевих значення товщини шару зростає швидше за теплопровідність. Коефіцієнт температуропровідність дуже швидко піднімається. Коефіцієнт теплоємності також є кривою другого порядку, досягає максимального значення при 1600Дж/кг $^{\circ}$ C.

Результати досліджень теплофізичних характеристик зерна пшениці від другого фактора температури нагрівання зерна представлені у вигляді графіків (рис. 3.2).

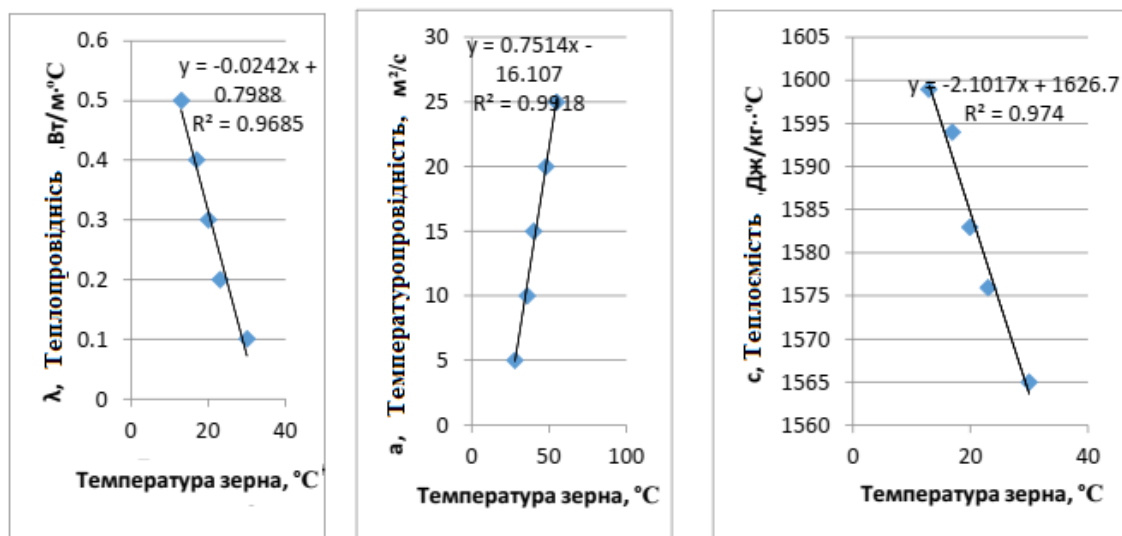


Рисунок 3.2 - Вплив температури зерна на теплофізичні характеристики

Коефіцієнт теплопровідності від температури зерна виглядає як крива другого порядку, причому зростає із збільшенням температури. Це зрозуміло тим, що всі пори матеріалу заповнені рідиною і таке явище відбувається із коефіцієнтом теплоємності зерна як лінійна функція.

Коефіцієнт температуропровідності виглядає обернено залежною з коефіцієнт теплоємності. Це цілком обґрунтовано, зміна всіх теплофізичних констант від температури зерна відбувається в зростаючому режимі.

Підвищення температури значно впливає на теплоємність за рахунок збільшення обсягу рідини в порах матеріалу збільшується повітря. При підвищенні густини зерна відбувається зменшення коефіцієнта температуропровідності. Це пояснюється зменшенням рідкого середовища у структурі зернівки. Температуропровідність у початковий момент підвищення щільності знижується. Це пояснюється тим, що волога не встигає нагріватися, починаючи з 1000 кг/м^3 щільності.

Теплопровідність різко зростає у межах від 1000 до 1100 кг/м^3 . З коефіцієнтом теплоємності відбувається зворотне явище максимальне значення при вологості 1000 кг/м^3 .

Результати досліджень теплофізичних характеристик зерна пшениці від третього фактора часу нагріву зерна представлені у вигляді графіків (рис. 3.3).

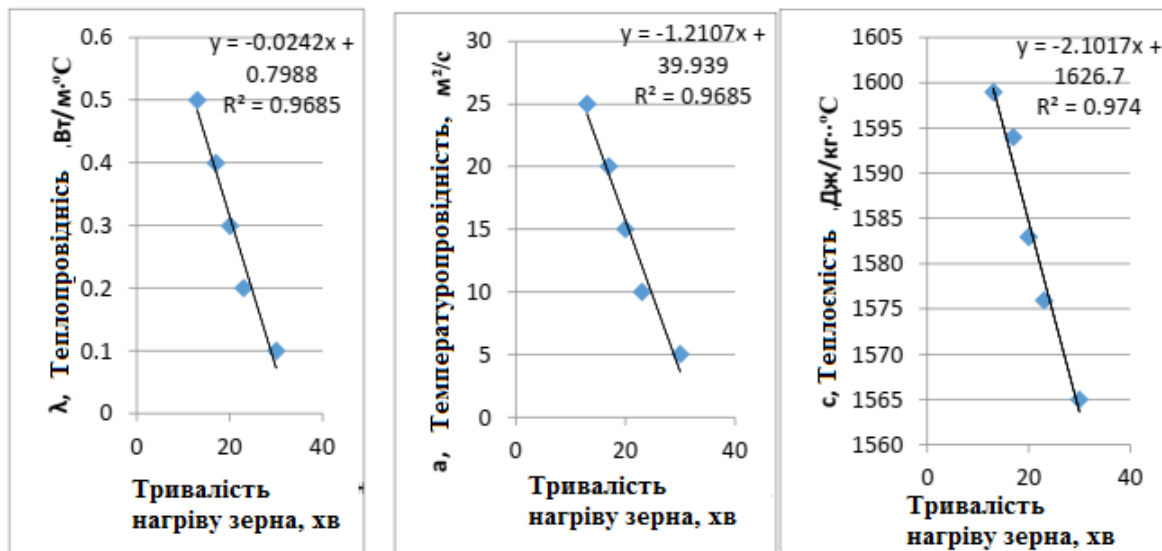


Рисунок 3.3 - Вплив часу нагріву зерна на теплофізичні характеристики

Залежність теплофізичних констант від вологості описуються кривими другого порядку та спостерігається зі зростанням вологості підвищення всіх трьох констант. Це пояснюється тим, що збільшення масової частки вільної вологи в місцях зіткнення частинок матеріалу, що грає роль «теплового містка», та сприяє створенню кращих умов для передачі частоти. Фактор

температури посилює роль вологи, як засобу теплопередачі від однієї частки до іншої.

При цьому перенесення теплоти відбувається за рахунок перенесення теплоти таким чином, при підвищених температурах яких одночасно може відбуватися два процеси:

- перенесення теплоти за рахунок теплопровідності;
- часткове перенесення теплоти шляхом масообміну.

Зі зростанням температури всі константи теплофізичних характеристик від температури зростають. Причому коефіцієнт температуропровідності ближче до лінійного закону, хоча є кривою другого порядку. Це явище можна пояснити тим, що волога всередині матеріалу виконує теплопередачу рівномірно за лінійною залежністю (рисунок 3.4).

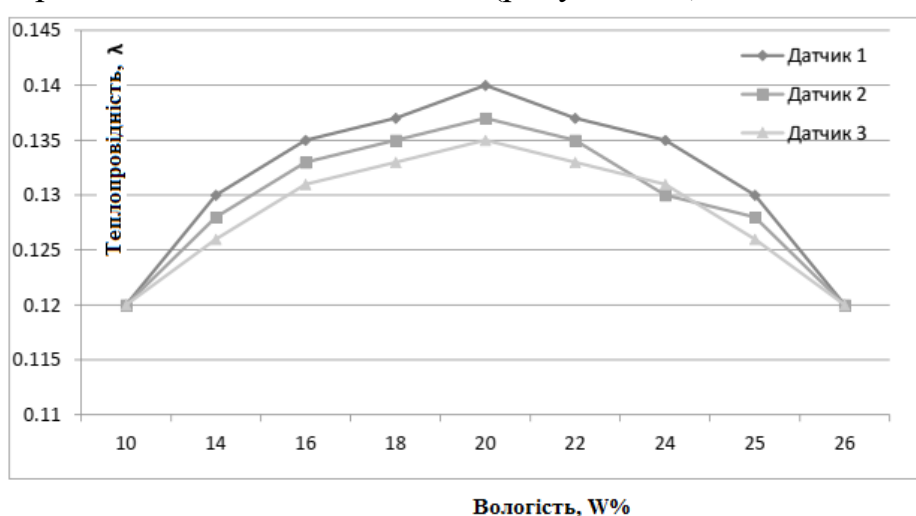


Рисунок 3.4 – Залежність теплопровідності шару зерна від вологості зерна

Теплопровідність зернового шару з підвищенням вологості зерна спочатку збільшується, а далі знижується (рис.3.4). Для шару 5см температури 25⁰С теплопровідність досягає максимуму 0,138Вт/(м⁰С) при вологість 18%. При розташуванні датчиків: спочатку датчик 1, в середині датчик 2 і біля кожуха датчик 3. З підвищенням (зниженням) температури зерна кожні 10⁰С теплопровідність зростає (знижується) на 2,5% порівняно зі значенням її за 25⁰С.

Спеціальні дослідження, показали, що теплоємність зерна складним чином залежить від його вологості та температури (рисунок 3.5).

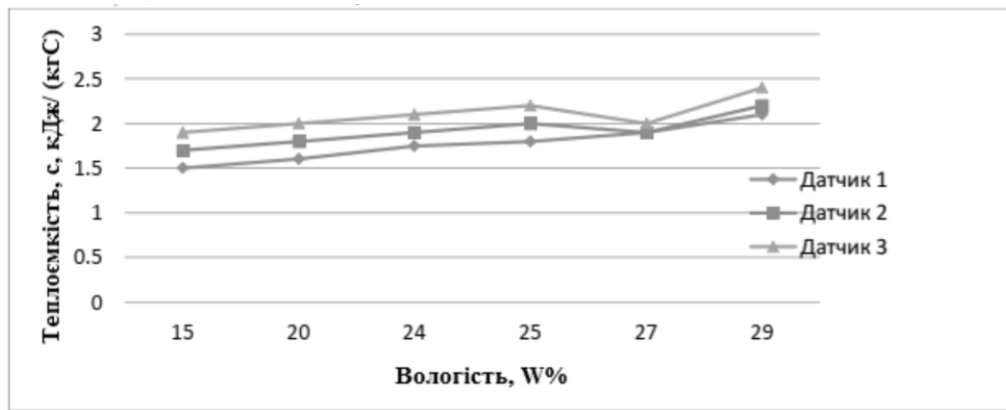


Рисунок 3.5 – Залежність теплоємності зерна від вологості і температури, датчик 1=1,5кДж/(кг·°С), датчик 2=1,75кДж/(кг·°С), датчик 3=1,8кДж/(кг·°С).

При вологості зерна 25% вона не залежить від температури, але при меншій вологості з підвищенням температури зростає, а за більшої вологості, навпаки, зменшується.

У зерновому шарі з підвищенням вологості з 10 до 25% температуропровідність безперервно знижується (рис. 3.6).

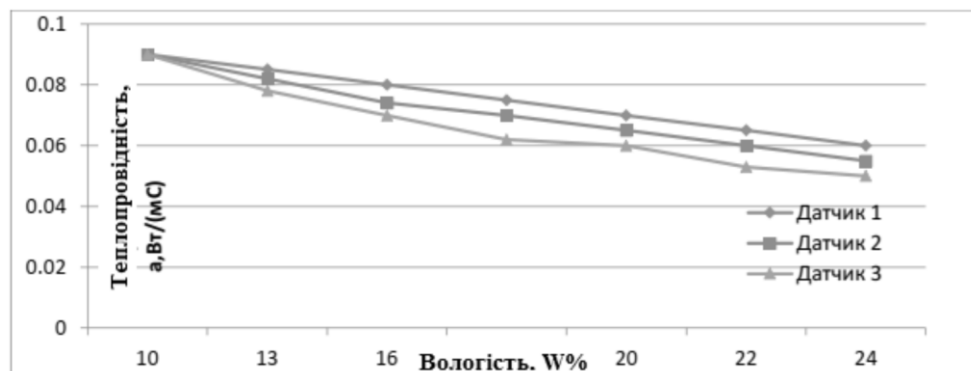


Рисунок 3.6 – Залежність теплопровідності шару зерна від вологості: датчик 1=0,06Вт/(м·°С), датчик 2=0,055Вт/(м·°С), датчик 3=0,5Вт/(м·°С).

3.4. Висновки по розділу 3

Запропонована схема сушильної установки, її конструктивна схема дозволяє сушити з температурою нагрівання 55⁰С дозволила одержати сумарну енергоємність 2,1 кВт·год/кг.

Кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання зерна та видалення з нього вологи при контактному способі передачі теплоти, залежить від температуропровідності матеріалу нагрівальної поверхні, різниці температур нагрівальної поверхні оброблюваного зерна (температурного градієнта) та експозиції теплового впливу.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасних технологічних прийомів сушіння зерна та специфічних особливостей застосування контактного способу нагріву показав, що незважаючи на досягнуті результати, необхідне проведення комплексних досліджень з розробкою фізичних та математичних моделей, що дозволяють якісно та кількісно оцінити ефективність сушіння зерна за допомогою нагрівачів.

2. Підвищення ефективності процесу сушіння зерна пшениці, забезпечується за рахунок контактного способу нагріву та руху зерна по гвинтовій поверхні.

3. Встановлено залежності фізико-механічних та теплофізичних властивостей зерна від температури, часу нагріву та швидкості переміщення зернової маси в камері сушіння на виході із сушильної установки.

4. Запропонована схема сушильної установки, її конструктивна схема дозволяє сушити з температурою нагрівання 55°C дозволила одержати сумарну енергоємність $2,1 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$.

Кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання зерна та видалення з нього вологи при контактному способі передачі теплоти, залежить від температуропровідності матеріалу нагріваючої поверхні, різниці температур нагріваючої поверхні оброблюваного зерна (температурного градієнта) та експозиції теплового впливу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Богомолів О. В., Верешко Н. В., Сафронова О. С. та ін. Зберігання та переробка сільськогосподарської продукції. – Х. : Еспада, 2008. – 544 с.
2. Дерев'янка Д.А., Бабченко С.Л. Аналіз конструкцій та класифікація контактних зерносушарок. Матеріали МНПК «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» – Харків: ДБТУ, 2021. С. 65-69.
3. Зберігання і технологія сільськогосподарських продуктів / Б. В. Лесик, Л. О. Трисвятський, В. Л. Снежко та ін. – К. : Головне вид-во ВО “Вища школа”, 1980. – 338 с.
4. Колтунов В. А. Технологія зберігання продовольчих товарів: підручник. – К. : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2003. – 538 с.
5. Мерко І.Т. Наукові основи і технологія переробки зерна. Одеса, 2001. 348 с
6. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.І. Сушіння зерна: Підручник. К.: Либідь, 1997. 320 с.
7. Станкевич, Г. Оперативне зерносушіння // The Ukrainian Farmer. 2011. № 3. С. 18-20.
8. Подпратов Г.І., Рожко В.І., Скалецька Л.Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва: підручник. – К. : Аграрна освіта, 2014. –. 393 с.
9. Подпратов Г. І., Войцехівський В. І., Мацейко Л. М., Рожко В. І. Основи стандартизації, управління якістю та сертифікація продукції рослинництва. – Луцьк : Терен, 2011. – 752 с.
10. Цугленок, Н.В. Функціональне опис процесу сушіння зерна / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян, Н.Н. Конусів // Укр. КрасГАУ. - 2005. - № 8. - С. 217-221.
11. Цуркан О.В., Пришляк В.М., Присяжнюк Д.В. Інтенсифікація сушіння зерна у процесі його післязбиральної обробки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця, 2017. № 2 (97). С. 99-104.
12. Хобін В.А, Бабіков А.Ю. Дослідження систем гарантує управління екстремальними нестационарними об'єктами з обмеженнями / Зб. наук. пр. Кіровоград. держ. техн. універ. - Кіровоград, 2002. - Вип. 11. - С. 54-57.