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

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ЗЕЙКАН ПЕТРО ПЕТРОВИЧ

УДК 631.362

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Удосконалення технологічного процесу сушіння 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

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Зейкан П.П. Удосконалення технологічного процесу сушіння зерна. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

В кваліфікаційній роботі наводиться короткий аналіз існуючих спосіб та конструктивних особливостей найбільш розповсюджених установок для сушіння зернового матеріалу.

Наведені теоретичні залежності, що відображають вплив основних діючих факторів на ефективність процесу сушіння зернового матеріалу.

Обґрунтовані оптимальні режими процесу теплової обробки і конструктивні параметри установки для сушіння зерна.

Ключові слова: сушіння, зерно, процес, установка, удосконалення.

ABSTRACT

Zeykan P.P. Improvement of the technological process of grain drying. Qualification for the advanced master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

The qualification work provides a brief analysis of the existing methods and design features of the most common installations for drying grain material.

Theoretical dependences reflecting the influence of the main active factors on the effectiveness of the grain material drying process are given.

The optimal regimes of the heat treatment process and design parameters of the grain drying plant are justified.

Key words: drying, grain, process, installation, improvement.

ЗМІСТ

ВСТУП 4

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА 7

1.1. Технології і засоби механізації теплової обробки зерна 7

1.2. Аналіз способів сушіння зерна 14

1.3. Аналіз конструкцій та класифікація засобів механізації процесу сушіння зерна 19

1.4. Висновки по розділу 1 24

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА 26

2.1. Аналіз процесу сушіння зерна в зерносушильних установках 26

2.2. Основи процесу сушіння зерна 29

2.3. Висновки по розділу 2 31

РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ 32

3.1. Опис конструкції установки 32

3.2. Методика дослідження установки для теплової обробки зерна 33

3.3. Висновки по розділу 3 34

ВИСНОВКИ 35

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 36

ВСТУП

Значення теплової обробки в сільськогосподарському виробництві надзвичайно велике. Немає такої галузі сільського господарства, в якій не застосовувалася б обробка матеріалів теплотою.

В даний час приблизно 15 % від всього споживання енергії в агропромисловому комплексі розвинених країн доводиться на процеси тепловій обробки сільськогосподарських матеріалів. Тому проблема зниження енергоємності цих процесів актуальна у всьому світі.

Невідповідність наявної технічної бази умовам сільськогосподарського виробництва (різні форми власності, дія ринкових механізмів) обумовлює необхідність корінних змін в технічному забезпеченні процесів теплової обробки сільськогосподарських матеріалів.

Теплова обробка сільськогосподарських матеріалів супроводжується комплексом тих, що одночасно протікають і взаємозв'язаних теплофізичних фізико-хімічних і біохімічних процесів.

Основна мета теплової обробки сільськогосподарських матеріалів – полягає в підвищенні стійкості сільськогосподарських матеріалів при зберіганні або тимчасовій консервації.

Об’єкт дослідження: Одним з найбільш необхідних і енергоємних в сільськогосподарському виробництві видом теплової обробки сільськогосподарських матеріалів є процес теплової обробки зерна в установках контактного типу.

Предмет дослідження: Закономірності роботи установки для теплової обробки зерна контактного типу.

Методологія і методи дослідження.

Вибір і обґрунтування оптимальних технологічних параметрів процесу теплової обробки зерна і режимів роботи засобів механізації даного процесу повинні бути виконані на основі всебічного аналізу фізичних і математичних моделей даного процесу з врахуванням основних конструктивних особливостей і умов функціонування відповідних пристроїв.

Сушіння забезпечує можливість тривалого зберігання готової продукції, а також ефективну попередню обробку сировини для більшості технологічних операцій процесів виробництва і переробки сільськогосподарської продукції.

В результаті сушіння багато сільськогосподарських продуктів значно покращують якість.

Разом з вітчизняними виробниками сільськогосподарської техніки більше десяти іноземних фірм представляють своє устаткування для теплової

обробки сільськогосподарських матеріалів на ринку. Проте імпортна техніка адаптована під європейські умови виробництва переробки і зберігання сільськогосподарської продукції, які відрізняються від умов українського виробництва. Тому щоб довести сировину українських виробників до базисних кондицій, використовуючи імпортну техніку необхідно декілька разів виконувати одну і ту ж операцію, порушуючи при цьому потоковість усього процесу, а і як наслідок, підвищити витрати енергії на даний процес.

Слід зауважити, що одне з головних завдань сільського господарства для вирішення проблеми продовольчої безпеки країни залишається питання збільшення виробництва зерна. Для вирішення даного завдання особливе значення придбаває вдосконалення організації зберігання, обробки і переробки зерна. Прогресивні в технологічних і економічних відносинах способи обробки, зберігання і переробки зерна забезпечують зниження втрат, сприяють збереженню і покращенню його якості, дозволить ефективніше використати даний найважливіший продукт харчування.

Збереження зерна, його обробка і переробка в масштабах нашій країни – є однією із складних і вартісних завдань, що вимагають сучасної матеріально-технічної бази. В даний час досвід передових господарств показує, що виробництво високоякісного зерна з кожним роком стає вигіднішим, так як, рівень рентабельності становить не менше 40 %. Найближчими роками можна спрогнозувати зростання попиту на нову техніку для обробки і зберігання зерна. Збільшення валових зборів зерна і зменшення питомих витрат на його виробництво можливе лише шляхом розробки і впровадження високоефективних технологічних засобів, створені на основі концептуальних положень їх розвитку.

Таким чином, створення і адаптація засобів механізації теплової обробки зерна до умов українського сільськогосподарського виробництва є актуальною і важливою науково-технічною проблемою.

Публікації:

Сукманюк О.М., Зейкан П.П. Аналіз процесу сушіння зерна в зерносушильних установках. Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи». 15-17 листопада 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 64-67.

Зейкан П.П. Види теплової обробки 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.58-61.

Зейкан П.П. Аналіз сучасних способів 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. 139-141.

Обсяг та структура роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 37 сторінках машинописного тексту, містить 14 рисунків, списку використаних джерел з 21 найменування.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА

1.1. Технології і засоби механізації теплової обробки зерна

Теплова обробка зерна знаходить широке застосування в різних технологічних процесах виробництва, переробки і зберігання продукції рослинництва. Теплову обробку застосовують для сушіння і обробки зерна, підготовки кормів до згодовування, підготовки сировини до зберігання, його переробки та ін.

«Теплова обробка зерна – це процес дії температурою на нього, як індивідуального фізичного чинника». [1-3] «Можливо також і спільний вплив температури з вологою або тиском (гідротермічна, баротермічна дія)». [4] Вибір способу теплової обробки залежить від технологічних властивостей обробленого зерна.

При тепловій обробці змінюється структурно-механічна, фізико-хімічна і органолептична властивість продукту, що визначають його кінцеву якість.

На рис. 1.1 представлені основні види теплової обробки зерна в різних процесах його переробки в кормові і продовольчі продукти

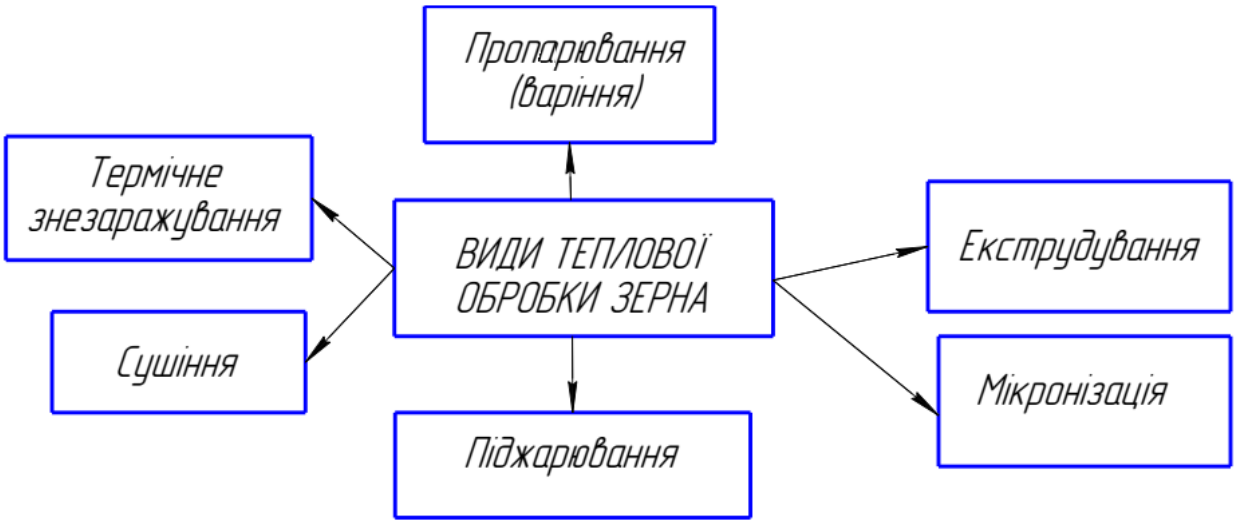

Рисунок 1.1 – Види теплової обробки зерна

«Пропарювання – один з важливих етапів теплової обробки зерна в процесі його підготовки до переробки в крупу. Його проводять при високій температурі (понад 100 °С) і надмірному тиску до 0,3 МПа». [5] Суть хімічних перетворень в процесі пропарювання полягає в частковій

клейстеризації крохмалю, утворенні невеликої кількості декстрину, що має склеювальні властивості та ін.

У борошномельному виробництві пропарювання зерна використовують при його гідротермічній обробці. Основна мета гідротермічної обробки – спрямована зміна початкових технологічних властивостей для їх стабілізації на оптимальному рівні.

«Структурно-механічні властивості ендосперму і оболонок зерна, що надходять на підприємства мають деякі відмінності. Внаслідок цього розділити їх складно, переробляти таке зерно важко. При проведенні гідротермічної обробки, передусім, прагнуть посилити відмінність властивостей оболонок і ендосперму (ядра). Процес на млині ведуть таким чином, щоб зменшити міцність ендосперму і підвищити міцність оболонок, а на крупозаводі – навпаки: підвищити міцність ядра і зменшити міцність оболонок (плівок)». [6]

При цьому, чим помітніше пройдуть зміни, тим вище буде ефективність переробки зерна у борошно і крупу.

Міра зміни технологічних властивостей зерна визначається конкретним чином гідротермічної обробки і особливостями взаємодії зерна з водою. Наприклад, гідротермічна обробка зерна гречки включає операції пропарювання, відлежування, сушки і охолодження. В результаті зміцнюється ендосперм, покращуються споживчі властивості крупи та її засвоюваність.

На рис. 1.2 наведений загальний вигляд пропарювача крупи ПК- 0,2.

Рисунок 1.2 – Пропарювач крупи ПК- 0,2: 1 – зернові бункера; 2 – електричний парогенератор; 3 – бункер охолоджувач

Стаціонарний пропарювач крупи ПК- 0,2 – періодичної дії призначений для гідротермічної обробки зерна, круп'яних культур з метою створення оптимальних умов процесу виробництва крупи, покращення харчових і смакових якостей та підвищення стійкості при зберіганні.

Принцип дії пропарювача заснований на одночасній дії тиску, температури і водяної пари на зерно, в результаті якого воно змінює свої технологічні, смакові якості і стає придатним для переробку в крупу.

Більшість теплових процесів по обробці зерна в кормо-виробництві здійснюють за допомогою теплових агрегатів, званих кормозапарниками. Теплові апарати кормоприготувань бувають газові та електричні.

«Газові кормозапарники поділяються: за конструкцією - на кормозапарювальні агрегати, запарювальні чани, запарники-м'ялки і запарники-змішувачі; за родом використання – на стаціонарні і пересувні; за характером дії – на запарники періодичної (рис. 1.3) і безперервної дії (рис. 1.4); за місткістю та продуктивністю». [7].

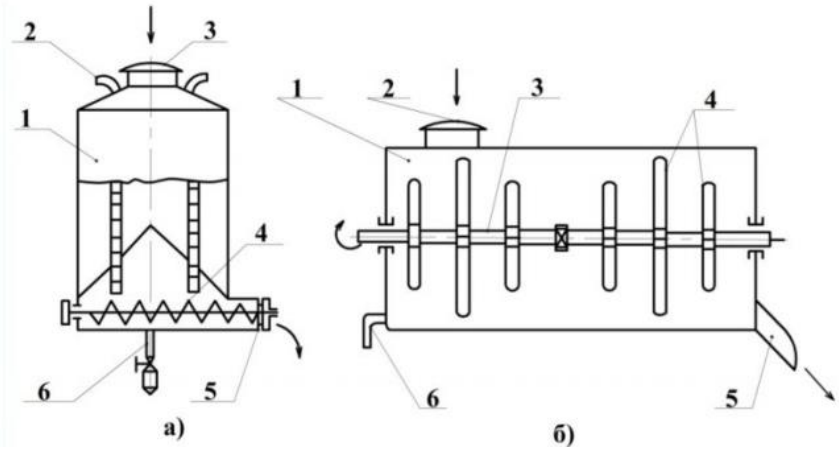

Рисунок 1.3 – Кормозапарники періодичної дії: а) запарник-м'ялка: 1 – вертикальний циліндр; 2 – паропровід; 3 – кришка; 4 – гвинтовий транспортер; 5 – решітки; 6 – патрубок; б) запарник-змішувач: 1 – циліндричний котел; 2 – кришка завантажувального люка; 3 – вал; 4 – лопасті; 5 – вивантажне вікно; 6 – паропровід

Електричні кормозапарники можуть бути двох типів: з нагрівальним елементом, розташованим усередині запарного чана, і з електродним котлом-пароутворювачем.

Підсмажування зерна застосовують при виробництві комбікормів для молодняка тварин, у яких недостатньо розвинена ферментативна система (крохмаль злакових культур вони важко перетравлюють). При даному виді теплової дії нагрів зернового матеріалу відбувається при обдуванні його гарячим повітрям або безпосередньому контакті зерна з сильно нагрітими

поверхнями. Зерно підігрівають при постійному помішуванні до світло-коричневого або коричневого кольору. Крохмаль в результаті теплової дії перетворюється на простіші вуглеводи – декстрин, мальтозу, окрім того, висока температура вбиває різні патогенні грибки.

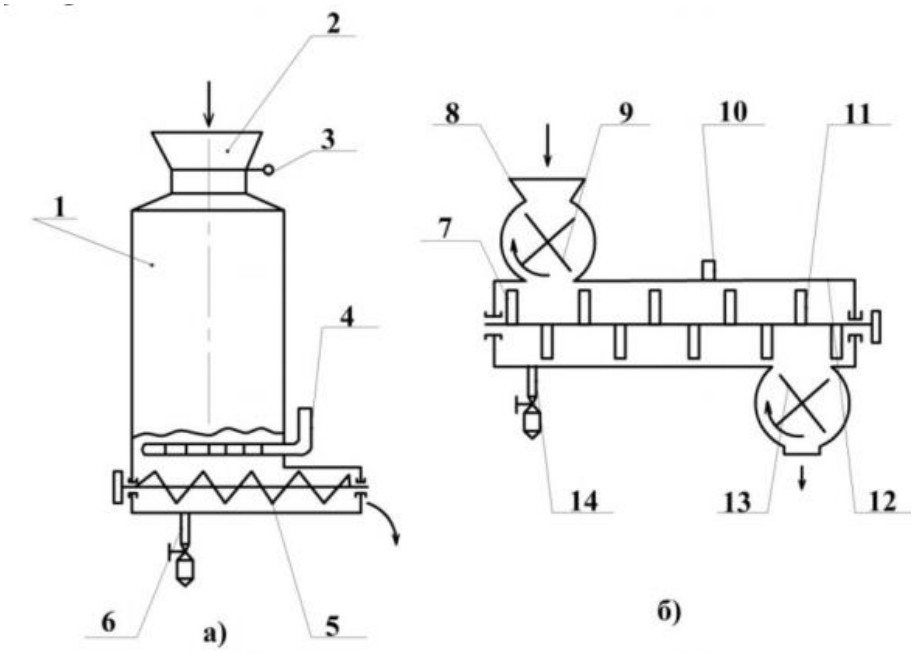

Рисунок 1.4 – Кормозапарники безперервної дії: а) з вертикальним циліндром; б) з горизонтальним циліндром: 1, 7 – циліндри; 2, 8 – завантажувальні бункера; 3 – засувка; 4, 10 – паропідвідні труби; 5 – вивантажний шнек; 6, 14 – патрубки для виходу конденсату; 9 – верхній шлюзовий затвор; 11 – лопать; 12 – вал; 13 – нижній шлюзовий затвор

Останнім часом роками зросли обсяги виробництва і використання в раціонах тварин зерна сої як ефективного білкового компонента. Одне з необхідних і обов'язкових умов його використання – попередня волого-теплова обробка, що здійснюється на спеціальних пропарювачах.

«Підсмажене зерно згодовують поросятам-сисунцям з 5-7-го дня життя і до відбирання, даючи на добу від 30...50 г до 120...150 г на порося (залежно від віку). Іноді підсмажене зерно дають телятам для покращення травлення».[8-10]

«Даний спосіб теплової обробки зерна, окрім кормовиробництва, отримав широке поширення і в процесах харчової промисловості. Так фрагмент лінії виробництва рослинної олії з насіння соняшнику складається із стадій – сушіння насіння, пропарювання і смаження мезги. При цьому в процесі теплової обробки вологість насіння зменшується з 9…15 % до 2…7 %. Температура насіння під час обробки – складає близько 50 ºС».[11] В

жаровні за рахунок теплової обробки досягається оптимальна пластичність продукту і створюються умови для полегшення віджимання олії на пресах. При смажінні вологість мезги знижується до 5…7 %, а температура підвищується до 105…115 ºС.

«Мікронізація – обробка зерна інфрачервоними променями. Швидке прогрівання зерна здійснюють за допомогою СВЧ-полей і інфрачервоного випромінювання. Мікронізація зерна останнім часом почала швидко поширюватися у сільськогосподарській практиці США, Англії, Японії та інших країнах». [12]

«Термін "мікронізація" був введений у зв'язку з обробкою зерна дією мікрохвиль. Мета даного методу полягає в тому, що зерно з підвищеною вологістю, у міру просування по транспортеру піддається інфрачервоному опроміненню. На переробних підприємствах Європи для даної мети застосовують кварцові галогенні лампи КГІ- 220-1000. Інфрачервоні промені проникають в зерно і викликають інтенсивну вібрацію молекул. Під дією тертя швидко виробляється внутрішня теплота, і за рахунок випаровуванню води підвищується тиск. За час проходження під інфрачервоними променями зерно стає м'яким, розбухає і розтріскується. Біополімери зерна (вуглеводи, білки) піддаються тим же структурним змінам, які відбуваються при гідротермічній і баротермічній обробці. Питомі витрати енергії на мікронізацію зерна складають в середньому 0,2…0,25 кВт×год/кг». [13]

«Мікронізація, як і інші способи теплової обробки, найбільш ефективна для зерна з метою підвищення санітарних якостей кормів. Мікронізація знищує шкідливу мікрофлору зерна і зменшує загальну кількість мікроорганізмів в 5…6 разів. При тривалості опромінення більше 45 секунд в зерні повністю гинуть багато бактерій, більше 60 секунд – плісняві гриби. Мікронізація попереджає зараження зерна шкідниками комор». [14]

Найкращий ефект досягають при опроміненні зерна впродовж 50…60 секунд.

Встановлено, що використання мікронізованного зерна для підгодівлі поросят сприяє прискоренню їх зростання і підвищенню приросту живої маси до 16 % за рахунок кращої перетравленості і засвоєння поживних речовин кормів раціону.

Екструдування – спосіб обробки зерна при спільній дії на нього високого тиску і температури.

«Для екструдування зерна використовують прес-екструдери ПЕК-125Х8, ПЕ-КМЗ та їх модифікації, а також прес-екструдери серії Е марки "BrOnto" виробництва України, що добре зарекомендували себе в комбікормовій і

харчовій промисловості». [15] На рис. 1.5 представлений загальний вигляд прес-екструдера Е – 250.

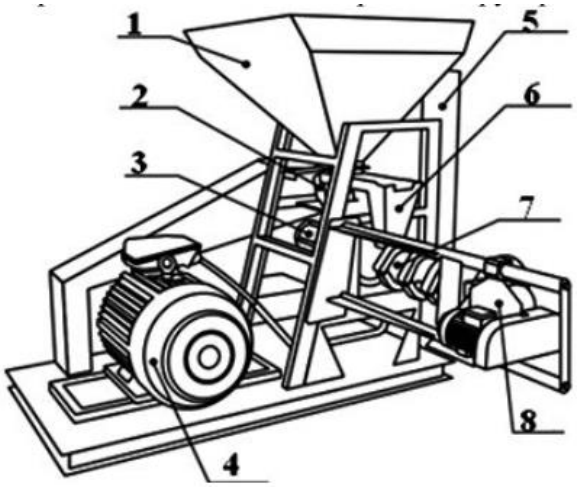

Рисунок 1.5 – Прес-екструдер «BRONTO» Е – 250: 1 – завантажувальний бункер; 2 – віброживильник; 3 – шпиндель; 4 – електропривод; 5 – шафа управління; 6 – магнітоуловлювач; 7 – гвинтовий робочий орган (шнек); 8 – відсікач

Екструдер призначений для екструзійної обробки зерна пшениці, ячменю, кукурудзи, гороху, жита, бобів та сої при отриманні високоякісних комбікормів для свиней та ВРХ.

«При екструдуванні зерно доводять до вологості 12...16 % та подають в спеціальний апарат (екструдер), де його піддають стискуванню шнеками (Р = 3,5...5 МПа)». [15-17] У шнеках зерно прогрівається до температури 120…180 °С в результаті підведення зовнішньої теплоти і теплоти, що утворилась при механічній обробці. При механічних діях і дії теплоти відбуваються істотні фізико-хімічні зміни основних компонентів зерна: денатурація білку, клейстеризація і декстринізація крохмалю. При цьому значно покращується санітарний стан продукту. Під дією високої температури і тиску майже повністю знищуються патогенна мікрофлора і плісневі гриби. Усе це значною мірою підвищує засвоюваність поживних речовин. Екструдовані корми тварини поїдають більш охоче, при цьому зменшуються випадки шлунково-кишкових захворювань, підвищується продуктивність. Проте екструдування є дуже енергоємним процесом (0,1…0,3 кВт×год/кг готового продукту).

«Сушіння – один з найпоширеніших способів теплової обробки зерна. Основне призначення сушіння – зниження вологості зерна до кондиційної. За багаторічними статистичними даними до 60 % свіжоприбраного зерна знаходиться у вологому стані і вимагає сушіння». [18]

Сушіння – процес видалення вологи з продукту, пов'язаний з використанням теплових і дифузійних процесів. Процес видалення вологи з

матеріалу супроводжується руйнуванням її зв'язку з "скелетом" висушуваного матеріалу, на що витрачається певна енергія.

«Термічне знезараження є профілактичним і винищувальним заходом боротьби з шкідниками зерна і продуктів його переробки». [19]

Ефективність знезараження зерна від шкідників залежить також від часу перебування його в сушарній установці при максимальній температурі нагріву. Є основа вважати, що при термічному знезараженні температура шкідників (чи їх яєць) близька до температури зерна, а повна їх загибель залежить як від температури нагріву, так і від втрати вологи самими шкідниками.

Особливу трудність з точки зору збереження якості зерна представляє термічне знезараження зерна пшениці, температура нагріву якої наприклад, в шахтних сушарках, не повинна перевищувати 50 °С. Нерівномірність нагріву зерна сильно впливає на ефективність знезараження, оскільки в шарах, в яких температура нагріву вища за допустиму, можливе псування зерна, а там, де вона нижча, шкідники не гинуть.

Незначна витримка нагрітого зерна не забезпечує повної загибелі шкідників як в рухливій, так і в нерухомій стадіях розвитку. Так наприклад, в шахтних сушарках тривалість перебування зерна при температурі максимального нагріву складає 5...10 хвилин, що є недостатнім.

Для посилення ефективності термічного способу знезараження створена зона витримки (відлежування) зерна між сушарної і охолоджувальної камерами сушарки.

Як відмітилось вище окрім основних видів теплової обробки зерна також відомий баротермічний спосіб теплового впливу. Основним показником якості обробки зерна при цьому вважають міру же латинізації крохмалю. Це явище відбувається частково і при гранулюванні комбікормів і кормосумішей, що включають зернову частину.

Збільшення ефекту обробки супроводжується зростанням витрат теплової і механічної енергії.

Таким чином, узагальнюючи вищевикладене, можна зробити висновок, що теплова обробка зерна має важливе технологічне значення. Разом із застосуванням цього виду обробки для видалення надмірної вологи з матеріалу (сушіння) теплову обробку в сільському господарстві застосовують для боротьби із зараженістю шкідниками і мікроорганізмами (термічне знезараження), при виробництві концентрованих кормів для сільськогосподарських тварин. У борошномельному і круп'яному виробництві застосовують гідротермічну обробку зерна з метою зміни початкових технологічних властивостей у заданому напрямі для стабілізації

їх на оптимальному рівні. Також теплову обробку матеріалів широко застосовують в харчовій промисловості. Ефективність застосування цього виду обробки головним чином залежить від рівня розвитку технології і відповідних засобів механізації теплових процесів.

Головною науково-практичною проблемою в тепловій обробці є відсутність сучасних засобів механізації цього процесу відносно невеликій пропускній спроможності, які здатні максимально забезпечити технологічні вимоги та істотно скоротити енерговитрати. Це і повніше використання потенціалу теплоти, що підводиться, і дотримання екологічних норм.

Перспективним напрямом є розробка установок для теплової обробки зерна, в яких передача теплоти відбувається при мінімальних втратах, коли енергія, що підводиться, практично повністю витрачається на нагрів і випарювання вологи з висушуваного матеріалу.

Один з перспективних варіантів компонування таких установок поєднує у собі застосування контактного способу передання теплоти в сушарній камері з хорошою теплоізоляцією. В даному випадку матеріал нагрівається від безпосереднього контакту з нагріваючою поверхнею. Для нагріву краще застосовувати електричні нагрівачі, оскільки вони мають більш високу економічністю і екологічністю процесу, а також дозволяють мінімізувати вартість і спростити конструкції установок для теплової обробки оскільки пропадає необхідність в такому устаткуванні як теплогенератор топка і т. д.

1.2. Аналіз способів сушіння зерна

Значущість режиму зберігання зернових мас в сухому стані призвела до поширення різних способів сушіння зерна.

Усі способи сушіння зерна і насіння основані на їх сорбційних властивостях. Якщо зернову масу або окремі зерна і насіння помістити в середовище де відбуватиметься віддача вологи у вигляді пари або навіть рідини (що буває рідше), то можна спостерігати процес висушування.

Сушіння зерна – не лише теплофізичний, але і технологічний процес, мета якого полягає в отриманні продукту з оптимальними властивостями.

Цією метою і визначається вибір способу сушіння, конструкції сушарної установки та режими її роботи. Властивості зернового матеріалу, конструкцію сушарки, режим її роботи слід розглядати в нерозривному зв'язку.

Вологе зерно сушать різними способами (рис. 1.6), які можна звести до двох основних принципів:

- видалення вологи із зерна без зміни її агрегатного стану, тобто у вигляді рідини;

- видалення вологи із зерна зі зміною її агрегатного стану, тобто шляхом перетворення її на пар.

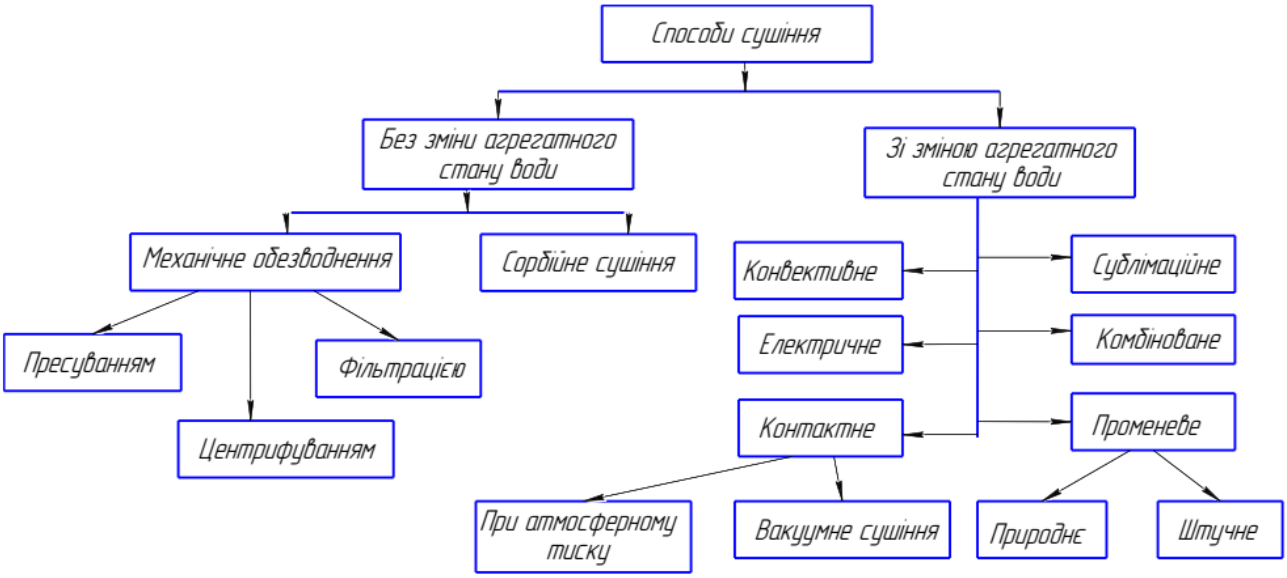

Рисунок 1.6 – Класифікація способів сушіння

Застосування окремих способів сушіння обґрунтоване енергією зв'язку вологи із зерном. При видаленні вільної вологи без зміни її агрегатного стану треба здолати лише гідравлічний опір твердого скелета тіла. При видаленні зв'язаної вологи зі зміною її агрегатного стану енергія витрачається як на подолання сили даного зв'язку, так і на теплоту пароутворення. Таким чином, механічне обезводнення вимагає менших витрат енергії, чим теплове сушіння. Недоліком механічного способу обезводнення є його обмежене використання.

Перший принцип обезводнення можна здійснити механічним (фільтрація, пресування, центрифугування) чи сорбційним способами при безпосередньому контакті вологого матеріалу з більше гігроскопічними речовинами (силікагелем, тирсою, сухим зерном та ін.).

Механічний спосіб обезводнення застосовують за наявності вільної вологи. При даному способі вільну вологу видаляють шляхом механічної дії на зерно внаслідок дії на вологу сили тяжіння або спільної дії сили тяжіння і відцентрової сили.

Сорбційний спосіб зазвичай застосовують для зерна, яке не переносить термічного сушіння або ж втрачає при нагріванні які-небудь цінні властивості наприклад, насіння квасолі, сої, вики, сочевиці та ін. При сорбційному сушінні вологе зерно змішують з вологопоглиначем і

витримують в протягом певного часу. Вологопоглинач вибирають з таким розрахунком, щоб згодом його можна було легко відокремити від висушеного зерна. Даний принцип використовують і при змішуванні вологого зерна з сухим зерном тієї ж культури. При цьому частина вологи переходить від вологішого зерна до менш вологому і вологість усієї зернової маси вирівнюється.

Сорбційне сушіння не вимагає витрати теплоти на нагрів та енергії на вентиляцію і забезпечує збереження якості матеріалу, зокрема зерна (особливо насіннєвого). Проте сушіння змішуванням проходить досить повільно (1.2 тижнів) і вимагає додаткових приміщень для виділення і регенерації (висушування) вологопоглинача.

«При акустичному сушінні волога екстрагується з оброблюваного зерна під дією ультразвукових хвиль. Сушіння протікає без підвищення температури висушуваного матеріалу, зерно при цьому зберігає початкові біологічні властивості». [20]

Процес акустичного сушіння складається з двох періодів. Перший – видалення вологи, яка знаходиться на поверхні зернівки, а та, що залишилася розподіляється по капілярах рівномірно і даний процес постійно повторюється, що дозволяє зменшити товщину граничного шару. Другий період починається з того моменту, коли зерно доходить до заданої вологості шляхом випару тобто волога починає переміщатися на поверхню, видавлюється бульбашками які виникають в рідині із-за коливань, при цьому в'язкість рідини зменшується.

Якщо механічне обезводнення доцільно застосовувати для видалення вільної вологи, то теплове сушіння – для видалення міцнішо зв'язаної вологи.

Тому теплове сушіння пов'язане з витратами теплоти на зміну агрегатного стану води, перетворення її з рідкого стану в газоподібний. Для випару вологи до об'єкту сушіння підводять теплоту.

«Залежно від того, як передається теплота об'єкту сушіння, розрізняють наступні способи теплового сушіння: конвективний, контактний (кондуктивний), променистий (радіаційний), електричний (струмами високої частоти), молекулярний (сублімацією). Крім того, все більшого поширення набувають високопродуктивні і економічні комбіновані способи сушіння матеріалів: конвективно-променистий, променево-високочастотний, променистий для сублімації та ін.». [21]

Конвективний спосіб широко використовують для сушіння зерна. Теплота, необхідна для нагріву і випаровування з нього вологи, передається від того, що рухається газоподібного теплоносія – агента сушіння (нагрітого повітря або його суміші з паливними газами) (рис. 1.7).

Агент сушіння не лише передає теплоту матеріалу, але також поглинає і відносить випаровану з нього вологу. Напрям руху агента сушінняи може співпадати з напрямом руху матеріалу (прямоток), мати протилежний напрям (протитечія) або бути перпендикулярним йому (перехресний напрямок). Вибір напряму руху агента сушіння залежить від властивостей матеріалу, що піддається сушінню.

Сушіння зерна підігрітим повітрям унеможливлює попадання в сушарну камеру і зіткнення із зерном продуктів згорання палива.

Проте при підігріванні повітря в парових або газових калориферах питома витрата палива на сушці в 1,5 рази більша в порівнянні з сушарками, працюючими на суміші паливних газів з повітрям. Це пояснюється великими втратами теплоти, що йде з димовими газами в атмосферу з топки парового котла або з газового калорифера.

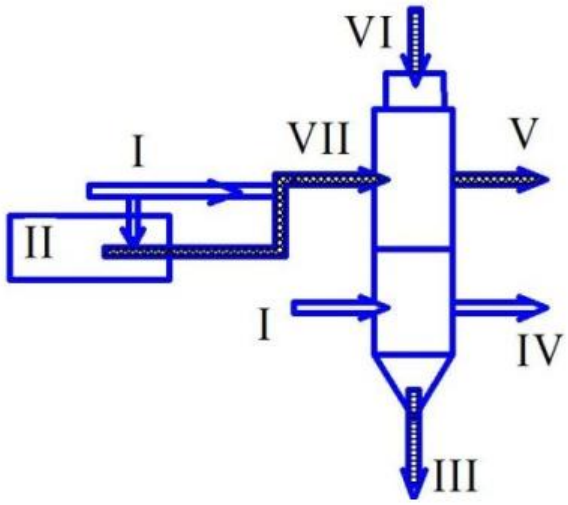

Рисунок 1.7 – Схема процесу сушіння зерна конвективним способом: I – атмосферне повітря; II – паливні гази; III – просушене зерно; IV – повітря, що відпрацювало; V – агент сушіння, що відпрацював; VI – зерно на сушіння; VII – агент сушіння

У топках сучасних зерносушарок, що працюють на рідкому або газоподібному паливі, при правильному їх обслуговуванні досягають повного згорання палива, і конвективне сушіння сумішшю повітря з паливними газами не викликає погіршення якості, кольору і запаху просушуваного зерна.

«При конвективному сушінні зерновий шар може знаходитися в різних станах – щільному, розпушеному, такому, що пересипається, падає. При сушці зерна в щільному, повільно такому, що рухається вертикальному шарі завтовшки 100…200 мм (у сушарках шахтного типу) зерно знаходиться в сушарній камері 30...60 хв. залежно від режиму сушіння. За цей час при

швидкості агента сушіння в зерновому шарі близько 0,3 м/с і температурі 120…150 °С зерно нагрівається до 45...55 °С, вологість його знижується на 5…6 %. В охолоджувальній камері, що розміщується під сушкою, вологість зерна протягом 15…20 хв. додатково знижується на 0,5…1,0 %». [21]

Враховуючи залежність термостійкості зерна від його вологості, в шахтних зерносушарках зазвичай застосовують так звані двоступінчаті режими, тобто у верхню частину шахти (перший ступінь сушіння) подають агент сушіння з нижчою температурою, ніж в нижню частину шахти (другий ступінь) [11].

Конвективне сушіння в розпушеному або "киплячому" шарі здійснюють на сітці. Через сітку зерно продувають агентом сушіння, що має швидкість 10...12 м/с. Внаслідок малого зниження вологості при швидкому нагріванні зерна сушарки з киплячим шаром не знайшли широкого практичного застосування.

Конвективне сушіння шару зерна, що пересипається, застосовують в сушарках барабанного типу, в яких зерно піднімається лопастями в повільно обертаючому барабані (циліндрі). Продуктивність таких сушарок не більше 8 т/год, а виділення вологи за один пропуск складає 3...5 %.

Конвективне сушіння здійснюють також в шарі, швидкість рухи зерна в якому в сотні разів вища, ніж в щільному шарі, що рухається.

У сучасних зерносушарках застосовують протитечійний шар, що падає, з штучно уповільненим рухом зерен (у камерах нагріву так званих протитечійних рециркуляційних сушарках). Вільне падіння зерна обмежують потоком агента сушіння, що рухається від низу до верху назустріч зерну, що падає, а також за допомогою решітчастих, трубчастих та інших елементів. «Зерно в камері нагріву таких сушарок знаходиться декілька секунд, тому можна використати агент сушіня з високою температурою (350...400 °С). За цей час зерно нагрівається до температури 50…60 °С, а вологість зменшується в середньому на 0,7 %». [16]

Для доведення зерна до сухого стану застосовують рециркуляцію, тобто повернення частини підсушеного зерна знову в камеру нагріву після змішування з сирим зерном. Цикли нагріву зерна, відлежування його в тепловологообмінні, проміжного і остаточного охолодження багаторазово повторюються.

Останніми роками отримав широке поширення рециркуляційно ізотермічний спосіб сушіння зерна як найбільш прогресивний. При даному способі сушіння значно скорочується число циклів рециркуляції, що зменшує витрати електроенергії на транспортування зерна. Крім того, даний спосіб знижує травмування поверхні зерна, що особливо важливо для насінного

зерна, бобових культур, рису. Спосіб рециркуляційно-ізотермічного сушіння дозволяє краще зберегти якість зерна і одночасно зменшити витрати на паливо і електроенергію у порівнянні з іншими різновидами конвективного сушіння.

Конвективне сушіння нерухомого зернового шару (насипи) можна проводити на майданчиках і в складах атмосферним повітрям за допомогою облаштувань активного вентилювання.

Залежно від температурних режимів процесу можна також виділити три способи конвективного сушіння.

1. Циркуляційне сушіння, при якій температуру теплоносія на вході в сушарку приймають високою, а експозицію знижують.

2. Сушіння з використанням середніх температур (наприклад, у барабанних сушарках), при цьому температура сушарного агента знаходиться, приблизно, в діапазоні 400...600 ºС.

3. Сушіння при низьких температурах (у сушарках з похилими решетами, шахтних і спірально-конічних); температура сушарного агента знаходиться в межах 100…200 ºС. Даний спосіб сушіння придатний для установок з невеликою продуктивністю.

«Контактним або кондуктивним, називають спосіб сушіння, при якому вологий матеріал (об'єкт сушіння) стикається з нагрітою поверхнею і отримує теплоту безпосередньо від цієї поверхні шляхом теплопровідності. Повітря при цьому способі потрібно тільки для видалення водяної пари з сушарки, будучи вологопоглиначем. Коефіцієнт тепловіддачі при даному способі значно вищий, ніж при конвективному сушінні та складає 170…180 Вт/ ($м^2 \cdot °С$) (при конвективному способі передання теплоти Ат = 35.115 Вт/($м^2 \cdot °С$)». [14]

1.3. Аналіз конструкцій та класифікація засобів механізації процесу сушіння зерна

В основу класифікації сушарок в залежності від завдань аналізу можуть бути покладені різні показники: пропускна здатність, металоємність, конструктивні особливості, спосіб підведення енергії, спосіб видалення вологи та ін.

Установки класифікують за такими ознаками:

- за способом дії: з механічним зневодненням, сорбційні, теплові, сублімаційні, пневматичні;

- за способом нагрівання теплоносія: з вогневим теплогенератором, водним калорифером, з паровим калорифером, з електронагрівом, комбіновані;

- за способом інтенсифікації процесу: з псевдозрідженням, з віброспонуканням робочих органів; з рециркуляцією; із застосуванням електроактивованого повітря (ЕАВ); комбіновані та інші;

- за принципом дії: періодичні чи безперервні;

- за величиною тиску повітря: вакуумні (100…900 Па); атмосферного тиску (0,1 МПа); з підвищеним тиском (понад 0,1 МПа); з високим тиском (понад 0,2 МПа);

- за конструкцією робочої камери: шахтні, барабанні, камерні, лоткові, трубчасті, бункерні, конвеєрні, стелажні, платформні, стрічкові та інші;

- за напрямом руху зерна та теплоносія: прямоточні, протиточні, з поперечним потоком, зі змішаним потоком, реверсивні;

- за призначенням: спеціалізовані, універсальні;

- по мобільності: стаціонарні та пересувні;

- за способом нагрівання сировини: повітряні, газові, газо-повітряні, нагрітою поверхнею, з променистою енергією;

- за станом зернового шару: із щільним малорухомим, розсипаним, псевдозрідженим (киплячим) зваженим шаром;

- за способом підведення теплоти: конвективні, контактні, променисті, електричні, комбіновані;

- за способом видалення вологи із сушильної камери: із застосуванням агента сушіння з використанням сорбентів, з хімічним поглинанням вологи.

Основною ознакою, за якою можна класифікувати установки для сушіння зерна і який дуже впливає на їх конструктивно-технологічну схему та ефективність використання енергії, є реалізований спосіб підведення теплоти.

Конвективний спосіб підведення теплоти найпоширеніший. На рис. 1.7 наведено класифікацію зерносушарок конвективної дії. У таких установках агент сушіння одночасно є теплоносієм і вологопоглиначем.

Сушіння зерна в нерухомому шарі характеризується тим, що швидкість зерна дорівнює нулю, а швидкість теплоносія значно менша за швидкість витання зерна.

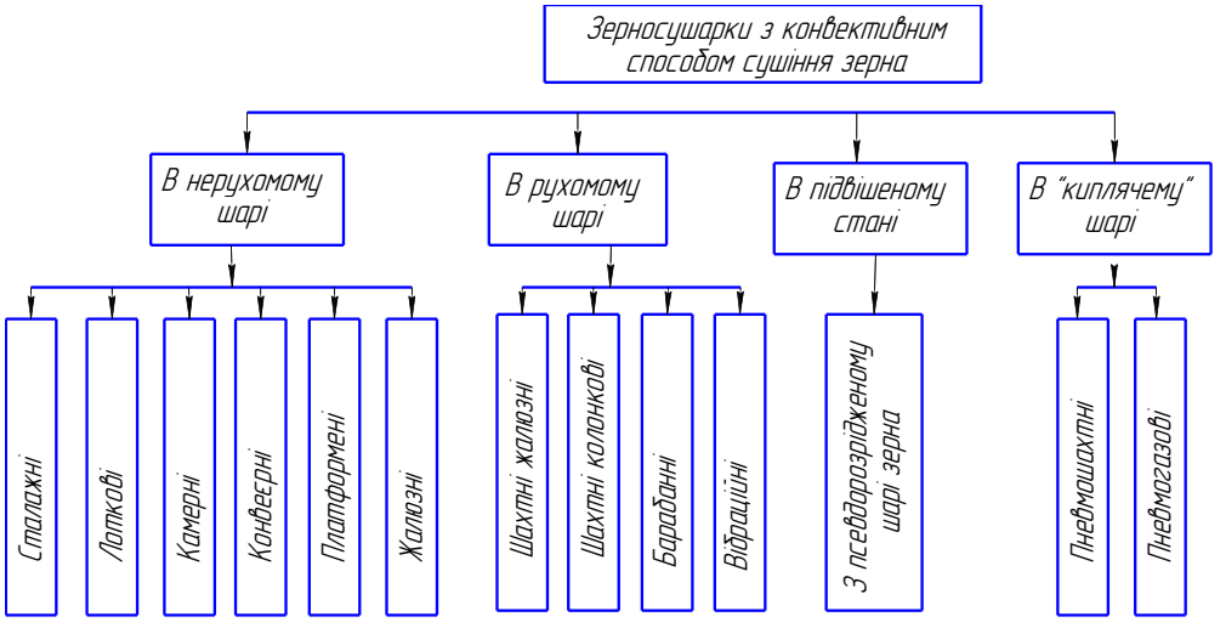

Рисунок 1.7 - Класифікація зерносушарок конвективної дії

Всі сушарки, що здійснюють сушіння зерна в нерухомому шарі - установки періодичної дії. Вони прості за будовою та використанням. Проте внаслідок нерівномірності нагріву зерна, низького теплового коефіцієнта корисного дії, підвищених експлуатаційних витрат та неможливості організувати потоковий технологічний процес ці зерносушарки не знайшли широкого застосування. До цієї групи відносять стелажні, лоткові, камерні, конвеєрні, платформні, ємності, що вентилюються, і жалюзійні зерносушарки (рис. 1.8, а, б, в, г, д, е, ж).

При сушінні в рухомому шарі швидкість зерна більша за нуль, а швидкість теплоносія трохи менше швидкості витання зерна. Установки для сушіння зерна в рухомому шарі найпоширеніші як у нашій країні, так і за кордоном. До них відносять шахтні (рис. 1.8, ж, з, і), барабанні (рис. 1.8, к) та вібраційні (рис. 1.8, л) зерносушарки.

Сушіння в «киплячому» шарі можливе в аерофонтанних сушарках (рис. 1.8, н) та в сушарках з псевдозрідженим станом зерна (рис. 1.8, м).

До недоліків таких сушарок можна віднести нерівномірність сушіння.

Сушіння зерна у зваженому стані здійснюється в трубахсушарках (рис. 1.8, о), пневмагазових рециркуляційних сушарках (рис. 1.8, п) і характеризується тим, що швидкість теплоносія значно більше швидкості витання зерна.

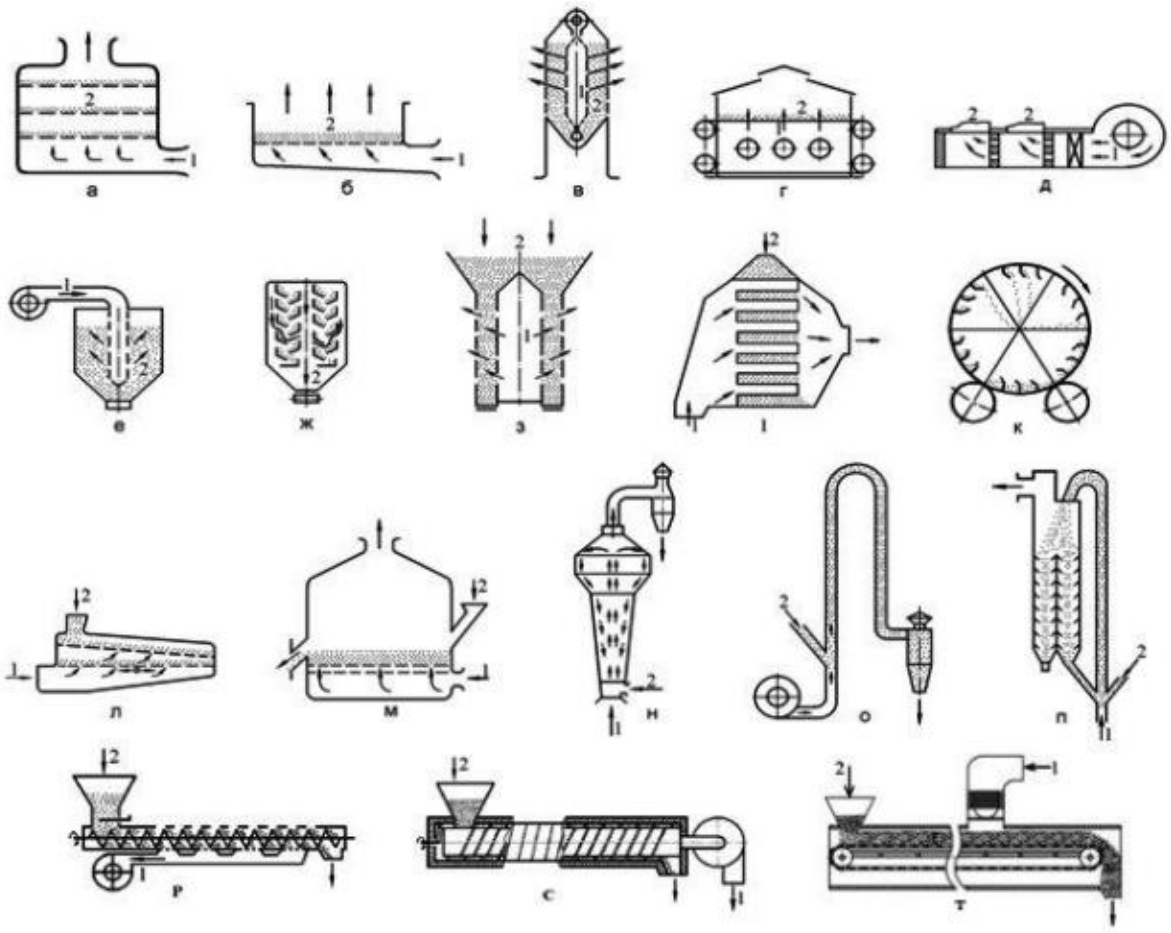

Рисунок 1.8 – Схеми сушильних установок: а – стелажна; б – лоткова; в – камерна; г – конвеєрна; д – платформна; е – вентильована ємність; ж – жалюзійна; з – колонкова; і – шахтна з коробами; к – барабанна; л – вібраційна; м – із псевдозрідженим станом зерна; н – аерофонтанна; о – труба-сушарка; п – пневмагазова рециркуляційна; р, с – спірально-гвинтові; т – сушарка з робочим органом, виконаним у вигляді скребкового транспортера; 1 – агент сушіння; 2 – зерно

Контактний спосіб сушіння можна здійснювати в зерносушарках з робочими органами, виконаними у вигляді спірально гвинтових або скребкових транспортерів. При цьому забезпечується сушіння зерна з одночасним його транспортуванням (рис. 1.18, р, с, т).

Розглянемо конструктивні особливості найпоширеніших сушарок.

Барабанні зерносушарки набули широкого поширення для сушіння зерна злакових культур, соняшнику та ін. У системі хлібопродуктів та в сільському господарстві застосовують сушарки барабанного типу як стаціонарні, так і пересувні. До стаціонарних барабанних відносять зерносушарки СЗСБ-8 та СЗСБ-8М, до пересувних – барабанну сушарку СЗПБ-2,5.

Основним елементом барабанних сушарок є горизонтальний або трохи нахилений циліндричний барабан, що обертається зі швидкістю 2...6 $хв^{-1}$, усередині якого переміщається по довжині і сушиться зерно. Всередині

барабана в залежності від продукту, що висушується, встановлені різного типу насадки або поздовжні лопаті, що сприяють інтенсифікації процесу сушіння.

Основна характеристика барабанних сушарок – вологонапруга об'єму барабана, тобто кількість випареної вологи з 1 м^3 об'єму барабана. Величина вологонапруги коливається від 6 до 44 кг вип. вл/(м^3·год) і залежить від типу, ступеня заповнення та частоти обертання барабана, теплофізичних властивостей та розмірів зерна, а також від температури, вологості та швидкості агента сушіння всередині барабана. Витрата теплоти становить 5,23...12,5 кДж/кг вик. вологи, а витрата електроенергії - 0,1 ... 0,2 кВт·год/кг вик. вл.

Зерносушарка стаціонарна барабанна СЗСБ-8 призначена для сушіння різних зернових та олійних культур будь-якого ступеня вологості та засміченості без попереднього їх очищення.

«Зерносушарка СЗСБ-8 складається з топки, завантажувальної камери, сушильного барабана, розвантажувальної камери, охолоджувальної колонки, розвантажувальної норії, вентилятора охолоджувальної колонки, вентилятора сушильного барабана, завантажувальної норії та приводного механізму». [7]

«Топка зерносушарки працює на рідкому паливі. Вона складається з камери згоряння, паливної системи живлення, вентилятора розпилювання палива, станини, димової труби та блокувального пристрою». [7]

Завантажувальна камера встановлена поруч із переднім торцем сушильного барабана і служить для подачі агента сушіння та сирого зерна в барабан сушарки.

На верхній стінці камери встановлений патрубок, що з'єднує камеру з подачею трубопроводу агента сушіння. Дно камери конусне і закінчується клапаном-мигалкою, через який надлишок вологого зерна можна видаляти з камери.

Сушильний барабан – шестисекційний, з підйомно-лопатевою системою. Хрестовина знімна, із чотирьох частин. У передній конусній частині барабана знаходяться шість гвинтових доріжок, що підводять зерно до секторів. Гвинтові доріжки наприкінці барабана призначені для його відведення.

Сушильний барабан закінчується конусним патрубком, до зовнішнього фланцю якого приєднано знімне підпірне кільце з шістьма люками, і має два бандажі, якими спирається на металеві ролики, що приводять барабан у рух.

Розвантажувальна камера служить для відведення відпрацьованого агента сушіння та висушеного зерна. Зерно з камери безперервно виводиться за допомогою шлюзового затвора, встановленого в кінці конусного днища камери. Шлюзовий затвор наводиться від електродвигуна через редуктор.

Відпрацьований агент сушіння видаляється вентилятором, розташованим над камерою.

Охолоджувальна колонка – виготовлена з двох вертикальних циліндрів , основна нижня частина – перфорована, а верхня частина виконана із суцільного листа. Кільцеве місце між циліндрами служить ємністю для зерна, в якій воно охолоджується завдяки проходженню повітря через шар зерна. Повітря для охолодження подається через зовнішні отвори циліндра.

До верхньої частини внутрішнього циліндра приєднаний всмоктувальний патрубок вентилятора, який відводить повітря, що відпрацював. Дно колонки конусне і закінчується шлюзовим затвором із приводом від електродвигуна.

Працює він періодично: включається датчиком верхнього рівня зерна, коли зерно доходить до максимального рівня. Вимикає затвор нижнього датчика рівня, що розташований у верхній частині охолоджувальної колонки. Колонка встановлена на станині, в яку вмонтовано бункер для накопичення зерна.

1.4. Висновки по розділу 1

Сушіння сировини, як один із видів теплової обробки сільськогосподарських матеріалів, є найбільш поширеним технологічним процесом.

У багатьох регіонах країни період збирання збігається з випаданням опадів, унаслідок чого збиране зерно має підвищену вологість. Тому сушіння зерна є однією з головних технологічних операцій післязбиральної обробки зерна.

Проведений аналіз технологій та засобів механізації процесу сушіння зерна дозволяє зробити висновок, що наявні конструкції пристроїв не досконалі і мають ряд недоліків (підвищені витрати теплоти на процес сушіння, підвищену металоємність, нерівномірність нагріву зернової маси, низький тепловий коефіцієнт корисної дії тощо).

Також описані вище пристрої для сушіння зерна, розраховані на більшу пропускну здатність, яка може досягати 120 т/год. Але в сучасних умовах розвитку сільського господарства країни доцільно створювати конструкції з невеликої пропускної спроможності, що забезпечують потреби окремого селянського (фермерського) господарства.

В даний час доведено можливість ефективного застосування електричного нагріву для сушіння зернових. Сконструйовані, випробувані та навіть застосовані на практиці інфрачервоні та високочастотні зерносушарки.

Зерно, що піддається сушінню в таких установках, відповідає всім технологічним вимогам, а в ряді випадків перевершує якість, просушене традиційним, конвективним способом. Однак, володіючи високою енергонасиченістю та необхідністю застосування додаткових пристроїв для відведення вологи, що утворилася, і специфічного формування зернового шару при малих обсягах переробки, ці способи надаються так само малоприйнятними. Економічні зміни у нашій країні виявили попит на мінізерносушарки, що мають відносно невисоку споживану потужність, високоекономічні, прості у вживанні та обслуговуванні, а головне – досить дешеві.

Обмежене поширення контактного способу передачі теплоти пов'язано з тим, що протягом усієї історії розвитку засобів механізації сушіння зерна потрібно створювати установки великої продуктивності, застосування в яких цього способу не забезпечувало необхідних економічних показників. Однак накопичений досвід показує, що міні сушарки на основі застосування контактного способу передачі теплоти зерну від електричного нагрівального пристрою потрібні в даний час.

Створення вогневих мінізерносушарок є безперспективним напрямом розвитку зерносушильної техніки через неможливість організувати на низькопотенційному рівні теплові конвекційні процеси. Тому основним способом нагрівання зерна в мінізерносушарках повинен бути електричний. Як зазначалося вище, променисте і високочастотне нагрівання на невеликих обсягах переробки також малораціональні. Отже, непрямий електронагрів у разі залишається гідною альтернативою традиційним способам підведення теплоти до об'єкту сушіння.

Застосування електронагріву і контактного, або комбінованого способів передачі теплоти зерну дозволить досягти максимальної відповідності установок, що створюються на цій основі, технологічним вимогам і вимогам, що пред'являються при експлуатації в умовах невеликих фермерських господарств (екологічність, універсальність тощо). Отже, перспективним напрямом розвитку засобів механізації процесу сушіння зерна є створення малогабаритних контактних установок для теплової обробки зерна, що дозволяють проводити передпосівну обробку, сушіння, прожарювання, прожарювання та знезараження зерна.

Таким чином, створення малогабаритних енергозберігаючих засобів механізації теплової обробки зерна, адаптованих до умов українського сільськогосподарського виробництва, що забезпечують необхідну якість готового продукту, є актуальною та важливою науково-технічною проблемою.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА

2.1 Аналіз процесу сушіння зерна в зерносушильних установках

Розробка нових методів і способів реалізації процесу сушіння зерна полягає у вирішенні комплексу взаємопов'язаних завдань, до яких відносяться дослідження та облік властивостей зерна, вибір способу підведення теплоти та обґрунтування (розрахунок) оптимального режиму, розрахунки тепло- та масопереносу та тепло- та масообміну, конструктивне оформлення зерносушильних установок, оснащення їх контрольно-вимірювальною апаратурою та системами автоматичного регулювання та управління.

При системному аналізі ці завдання вирішують з широким використанням моделювання, що дає можливість обґрунтувати не тільки параметри оптимального режиму процесу, але й вибрати найбільш доцільний спосіб управління процесом сушіння у виробничих умовах.

Моделювання є методом вивчення динамічних систем і процесів, які у них проходять. Поняття моделювання тісно пов'язане з поняттям інформації, що характеризує впливи, одержувані системою та її окремими елементами, і навіть зміни, які проходять у системі в результаті цих впливів.

При розрахунку та конструюванні зерносушильної техніки можуть бути використане фізичне, інформаційне та математичне моделювання.

Фізичне моделювання здійснюють у різний спосіб. Принциповою особливістю такого моделювання є повне чи часткове збереження фізичної природи досліджуваного процесу. Фізична модель процесу, системи може бути представлена у вигляді установки, що дозволяє отримати ідентичну копію реальної динамічної системи та процесів, які проходять у ній під час сушіння зерна.

Фізичне моделювання зерносушильної техніки почало застосовуватися значно раніше, ніж математичне моделювання. Це можна пояснити тим, що аналітичні методи розрахунку зерносушарок та процесу сушіння зерна дуже складні.

Процес сушіння зерна в установках з контактним способом передачі теплоти як процес зі складною фізико-хімічною системою можна уявити у вигляді наступної функціональної фізичної моделі параметричних залежностей даного процесу (рисунок 2.1).

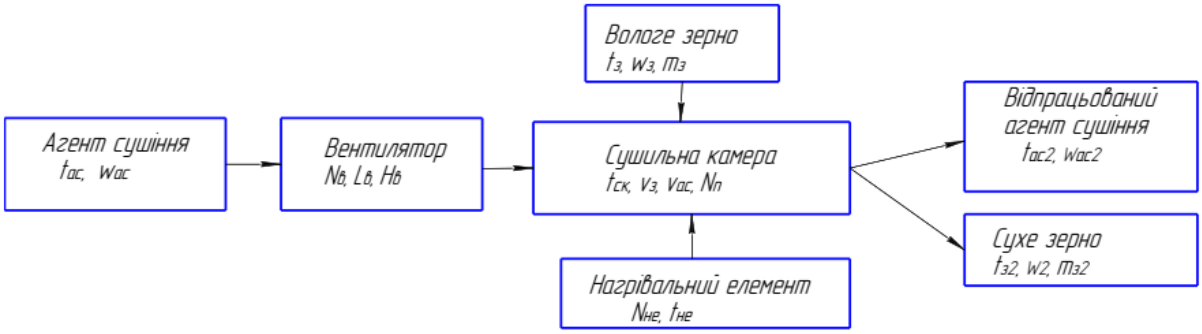

Рисунок 2.1 – Функціональна фізична модель контактного пристрою для сушіння зерна: t_{ac} – температура агента сушіння, ° С; ω_{ac} – вологість агента сушіння, %; $t_з$ – температура зерна, ° С; $w_з$ – вологість зерна, %; $m_з$ – маса зерна, кг; $t_{нгп}$ – температура нагріваючої поверхні, ° С; $v_з$ – швидкість руху зерна, м/с; v_{ac} – швидкість руху агента сушіння, м/с; $N_п$ – потужність, необхідна на привід робочого органу, що транспортує, кВт; $N_{не}$ – потужність, що споживається нагрівальним елементом, кВт; $t_{не}$ – температура нагрівального елемента, ° С; $N_в$ – потужність, споживана вентилятором, кВт; $L_в$ – продуктивність (подача) вентилятора, $м^3$/год; $H_в$ – тиск (напір), створюваний вентилятором, Па.

У цьому випадку на зерно, що знаходиться в сушильній установці, впливають повітряний потік (агент сушіння), створюваний вентилятором і теплота, що передається від нагрівального елемента. Дана схема характеризується такими параметрами, як пропускна здатність пристрою для сушіння зерна Q, кг/год, та енерговитратами на процес випаровування вологи q, МДж/кг.

Для вивчення технологічного процесу сушіння зерна в установці контактного типу представимо її у вигляді інформаційної моделі, побудованої за типом "вхід-вихід" (рис. 2.2).

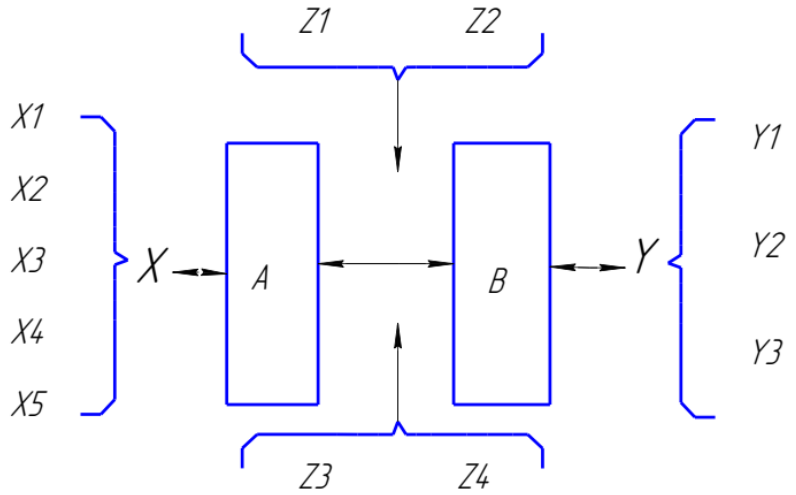

Рисунок 2.2 – Інформаційна модель процесу сушіння зерна в установці контактного типу

Процес сушіння зерна – це система заходів та засобів, спрямована на перетворення вихідного стану зерна (масив А) у продукцію різного призначення: продовольче, фуражне та насіннєве зерно (масив В).

Масив А (вхід моделі) характеризує вектор-функцію зовнішніх факторів:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}, \quad (2.1)$$

де x_1 – вихідна вологість зерна; x_2 – вихідна температура зерна; x_3 – вигляд зернової культури; x_4 – температура навколишнього повітря; x_5 – вологість навколишнього повітря.

Як вихідна змінна (масив В) приймаємо вектор-функцію якісних показників процесу сушіння:

$$Y = \{y_1, y_2, y_3\}, \quad (2.2)$$

де y_1 – кінцева вологість зерна; y_2 – температура зерна на виході із сушильної камери; y_3 – травмування зерна.

Управління впливами моделі є швидкість руху зерна в установці z_1, середня температура поверхні, що гріє z_2, швидкість руху агента сушіння в сушильній камері z_3, напрямок руху агента сушіння в сушильній камері по відношенню до напрямку руху матеріалу, що висушується (проток, прямоток і т. д.) z_4.

Для математичного моделювання зерносушарок та процесу зерносушіння вихідними є системи рівнянь, що зв'язують вихідні змінні з вхідними впливами, або взаємозв'язок параметра оптимізації процесу сушіння зерна з незалежними факторами, що діють.

Параметри оптимізації, залежно від об'єкта та мети дослідження можуть бути різноманітними. Для характеристики процесу сушіння зерна основними параметрами є техніко-економічні (пропускна здатність, витрати енергії на процес випаровування та видалення вологи із зерна і т. д.) та технологічні, що визначають якість готового продукту (температура зерна на виході з сушильної камери, травмування зерна і т. д.).

Параметр оптимізації має бути: ефективним з точки зору досягнення мети, універсальним, статистично ефективним, що має фізичний зміст, легко обчислюваний.

Вибрані незалежні фактори процесу мають безпосередньо впливати на об'єкт дослідження. Розрізняють кількісні та якісні фактори. У сукупності чинні фактори повинні мати сумісністю та відсутністю лінійної кореляції.

Після вибору параметра оптимізації та факторів, що діють, переходять до вибору математичної моделі досліджуваного процесу, під якою розуміють вид функції відгуку. Вибрати модель – значить вибрати даний вид функції,

записати рівняння. Основна вимога до моделі – це здатність передбачити напрямок подальших дослідів, причому передбачати з необхідною точністю, домогтися адекватності моделі.

2.2. Основи процесу сушіння зерна

Процес сушіння зерна є не тільки теплофізичним, а й технологічним процесом, у характері перебігу якого вирішальну роль відіграє форма зв'язку вологи з матеріалом, що висушується.

У статиці процесу сушіння зерна розглядають зміни, в результаті яких настає рівноважний стан вологого матеріалу, тобто припиняється зовнішній обмін вологою між матеріалом та повітрям. Вологість матеріалу, що відповідає стану рівноваги, є рівноважною вологістю $\omega_р$.

Рівноважна вологість, $\omega_р$ висушувального зерна залежить від парціального тиску пари в повітрі $p_п$, а, отже, і від його відносної вологості φ, так як

$$\varphi = p_п / p_н, \qquad (2.3)$$

де $p_н$ – тиск насиченої пари при даній температурі, Па.

Подібні залежності для зерна графічно можна подати у вигляді кривих S-подібної форми. Якщо крива отримана в результаті зволоження матеріалу, її називають ізотермою сорбції; якщо крива отримана в внаслідок випаровування води з матеріалу – ізотермою десорбції.

Ізотерма десорбції (крива зрівноваженості вологості), типова для процесу сушіння зерна, як капілярно-пористого колоїдного матеріалу (рис. 2.3). Кожна точка цієї кривої відповідає рівноважному стану матеріалу за певної вологості повітря. При зміні вологості повітря рівновага порушується. Так, наприклад, за відносної вологості повітря φ_1 матеріал, що висушується, має рівноважну вологість ω_1.

Якщо вологість повітря збільшиться до значення φ_2, то рівноважний стан порушиться, вологість матеріалу почне зростати за рахунок сорбції вологи з повітря. Рівновага відновиться лише за нової рівноважної вологості зерна ω_2, що відповідає вологості повітря φ_2.

При зниженні вологості повітря до φ_3 вологість матеріалу зменшиться до φ_3 внаслідок десорбції вологи з матеріалу. Зневоднення зерна шляхом десорбції вологи відбувається доти, доки не вийде вся вільна волога. Критична вологість матеріалу $\omega_к$ (кінцева рівноважна вологість) відповідає наявності в зерні лише пов'язаної вологи, яку не можна видалити шляхом десорбції.

Таким чином, крива рівноважної вологості (ізотерма десорбції) поділяє площу графіка на дві частини: верхню, між кривою, віссю ординат та прямий

φ = 100 %, її називають областю сорбції; нижню, обмежену кривою, віссю абсцис і прямими ω = ωг і ω = ωк, - областю десорбції.

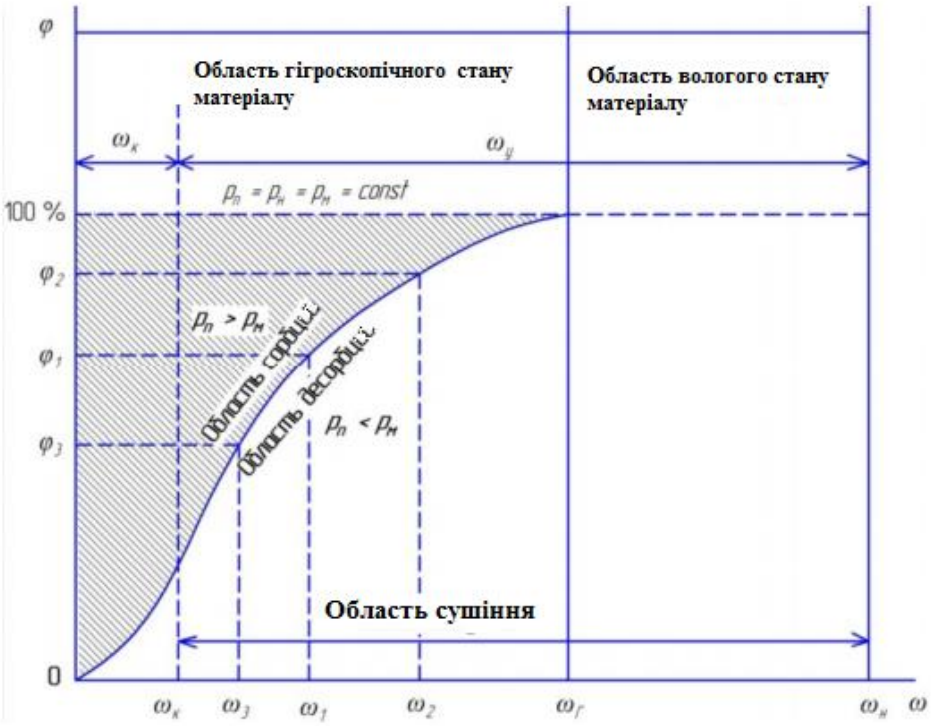

Рисунок 2.3 – Ізотерма десорбції: φ – відносна вологість повітря, %; ωн, ωг, ωк – початкова, гігроскопічна та критична (кінцева) вологості зерна відповідно, %; ωу – волога, що видаляється, %; рп і рм – парціальний тиск пари в навколишньому повітрі та на поверхні зерна відповідно, Па; рн – тиск насиченої пари, Па

Характерна у цьому графіку гігроскопічна точка (ω = ωг, φ = 100 %): ліворуч від неї розташовується область гігроскопічного, праворуч – область вологого стану матеріалу.

Область від ωн до ωк (нижче ізотерми десорбції) називають областю сушіння. Так як при сушінні зерна нагрітим повітрям з певними параметрами (вологість повітря, температура та швидкість руху) можна видалити не всю вологу, а тільки довести матеріал, що висушується, до рівноважної вологості ωр, вводять поняття вологи, що видаляється, максимальна кількість якої можна визначити з виразу:

$$\omega_y^{max} = \omega_н - \omega_к, \qquad (2.4)$$

Зміна середньої (інтегральної) температури зерна t у процесі сушіння характеризує температурну криву (рис. 2.4).

На початку процесу у стадії прогріву зерна температура його поверхні швидко підвищується, досягаючи температури мокрого термометра психрометра. Надалі протягом першого періоду сушіння температура матеріалу стала. У даний період випаровування вологи відбувається з

найбільшою швидкістю. Вся теплота, яку отримують зерна, витрачається на випаровування вологи. Таким чином, перший період сушіння характерний не тільки сталістю швидкості сушіння, але і сталістю температури зерна, що висушується.

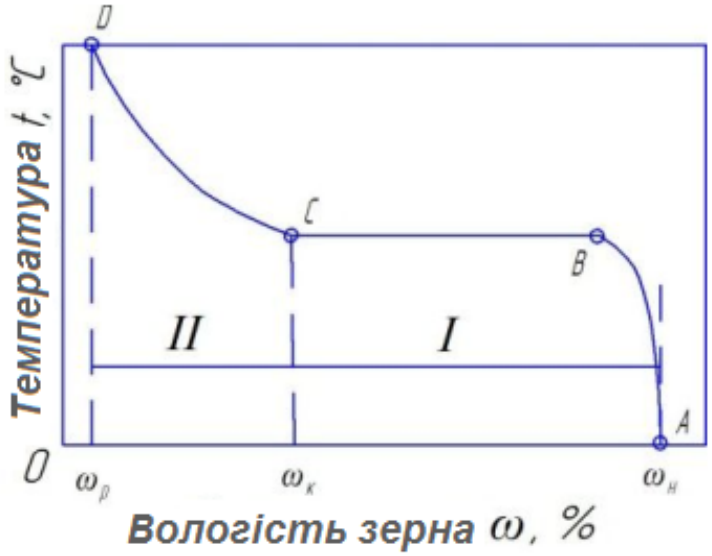

Рисунок 2.4 – Температурна крива

Починаючи з першої критичної точки, температура зерна, що висушується підвищується, при досягненні рівноважної вологості вона дорівнюватиме температурі агента сушіння. Відповідно до закономірностей зміни швидкості сушіння та температури зерна другий період сушіння називають періодом спадної швидкості сушіння та зростаючої температури матеріалу.

Перша критична точка поділяє весь процес сушіння на два періоди, які відрізняються між собою і швидкістю сушіння, і температурою зерна. Таким чином, у першому та другому періодах створюються різні умови сушіння зерна, що по-різному впливають на його якість.

Критична вологість зерна $\omega_к$, коливається у досить широких межах (17…24 %) і залежить від таких факторів, як початкова вологість зерна, режим сушіння і т.д.

2.3. Висновки до розділу 2

Встановлені вимоги та критерії, що пред'являються до створення зерносушильної техніки, а також основні залежності від моделювання процесу сушки зерна дозволяють виробляти нові зерносушилки, ефективні зточки зору отримання якісного готового продукту при мінімальних затратах енергії.

РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Опис конструкції установки

Як джерело теплоти для обігріву поверхні сушильної камери використовують пар, гарячу воду, електрику, газ та інші види палива. Під контактною поверхнею розуміють нагріту поверхню сушильної камери, що безпосередньо контактує із зерновим шаром. Швидкість способу теплопередачі залежить від температури нагрівання поверхні, товщини зернового шару, а також терміну контактування висушуваного зерна з нагріваючою поверхнею.

Запропонована конструкція установки для сушіння зерна (рис. 3.1.) містить циліндричний кожух 1, завантажувальний бункер 2, вивантажувальне вікно 3, робочий транспортувальний орган 4 розміщений всередині кожуха з можливістю обертання, а також нагрівальні елементи 5. Зовнішня поверхня кожуха покрита шаром теплоізолюючого матеріалу 6. Транспортуючий робочий орган виконаний у вигляді шнека з перфорованими витками діаметр перфорації не перевищує мінімального розміру зерна. Кожух виконаний складовим, а його складові частини розділені між собою кільцями, виконаними з теплоізолюючого матеріалу. Нагрівальні елементи розміщені на зовнішній поверхні кожуха під шаром теплоізолюючого матеріалу між завантажувальним бункером та вивантажним вікном з можливістю індивідуального регулювання температури нагрівання кожної з ділянок кожуха. Кожна складова частина кожуха має індивідуальний нагрівальний елемент, а торцева поверхня кожуха з боку завантажувального бункера виконана перфорованою. Крім того, пристрій має охолодний елемент, який складається з вентилятора і повітроводу, що з'єднується з внутрішньою порожниною кожуха.

Установка працює наступним чином. Включають нагрівальні елементи 5, 6 в непарних складових частинах кожуха 1. Після досягнення необхідної температури непарних складових частин кожуха 1 подають зерно в завантажувальний бункер 2, далі воно переміщається транспортуючим робочим органом (шнек) 4 до вивантажувального вікна 3. Одночасно вмикаючи вентилятор 8 зерно нагрівається і втрачає надлишки вологи. Вентилятор 8 подає повітряний потік по повітропроводу 7 через нижню зону парних складових частин кожуха 1 рівномірно обдуваючи і охолоджуючи зерно. Висушене та охолоджене зерно видаляється з пристрою через вивантажувальне вікно 3.

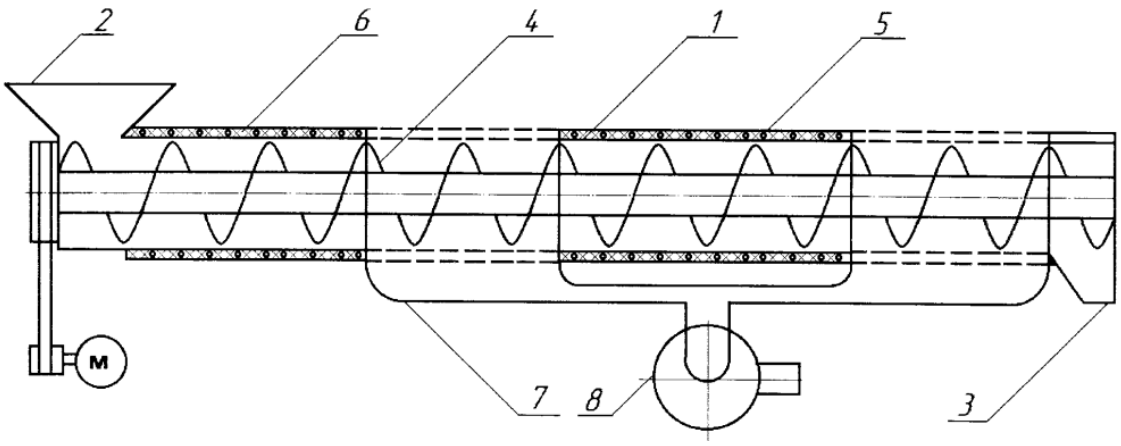

Рисунок 3.1 – Установка для сушіння зерна: 1 – кожух; 2 - завантажувальний бункер; 3 – вивантажувальне вікно; 4 – шнек; 5, 6 – нагрівальні елементи; 7 – повітропровід; 8 – вентилятор

Нагрівальна поверхня оброблена та ізольована з внутрішньої сторони що контактує з матеріалом. Електричний нагрівальний елемент дозволяє регулювати температуру поверхні від 20 до 200 °С. Вимірювання температури нагрівальної поверхні перевіряють перед початком досліду, далі рівномірність температурного поля по довжині поверхні визначають за допомогою встановлених у ній термопар.

Транспортуючий робочий орган виконаний з перфорованої труби, на якій закріплені витки шнека. Привід здійснюється від електродвигуна постійного струму.

3.2. Методика дослідження установки для теплової обробки зерна

При аналізі теоретичних робіт ранжували значущість факторів процесу теплової обробки для того, щоб у подальшому незначними факторами можна було знехтувати. Це дозволяє отримати відносно нескладну математичну модель процесу за збереження адекватності і спростити її подальший аналіз.

При виборі оптимального поєднання змінних факторів, що впливають на процес теплової обробки зерна, застосовували критерій, який слугує показником сумарних питомих затрат енергії на 1 кг випареної вологи q, кДж/кг, що представляє собою відношення теплоти Q, кДж, що затрачається на сушіння, до маси випареної вологи M, кг.

Досліджувана установка для теплової обробки зерна дозволяє проводити дослідження у широких межах зміни наступних основних режимних параметрів: частоти обертання шнека - від 1 $с^{-1}$ до 3 $с^{-1}$ зміною напруги, що подається на двигун постійного струму від 80 до 225, швидкості руху насіння від 0,0025 м/с до 0,0077 м/с; потужності нагрівального елемента

в залежності від необхідної температури нагрівальної поверхні від 0,93 до 1,35 кВт; потужності електродвигуна приводу шнека – від 0,04 до 0,16 кВт.

Аналіз розрахунків значень критеріїв Стьюдента, Фішера, Кохрена та порівняння їх з табличними значеннями підтвердив адекватність отриманих математичних моделей, значущість їх коефіцієнтів та достовірність проведених експериментів.

Отримані математичні моделі процесу сушіння зерна показали, що сумарні питомі витрати теплоти на випаровування вологи із зерна пшениці при прямотоці мінімальні (q_{min} = 3,04 МДж/кг) за швидкості руху зерна $v_з$ = 0,0036 м/с та середній температурі поверхні кожуха $t_п$ = 62,7 ºС. Однак отриманий мінімум енерговитрат відповідає режимам процесу, тому що при $v_з$ = 0,0034 м/с пропускна здатність установки не перевищувала 85 кг/год, що економічно недоцільно. Тому оптимальними сумарними питомими витратами теплоти вважатимемо такі, за яких пропускна здатність установки максимальна, а разовий вологозйом – не менше 1,5%. З рис. 3.2 видно, що ця умова виконується при $v_з$ = 0,036 м/с.

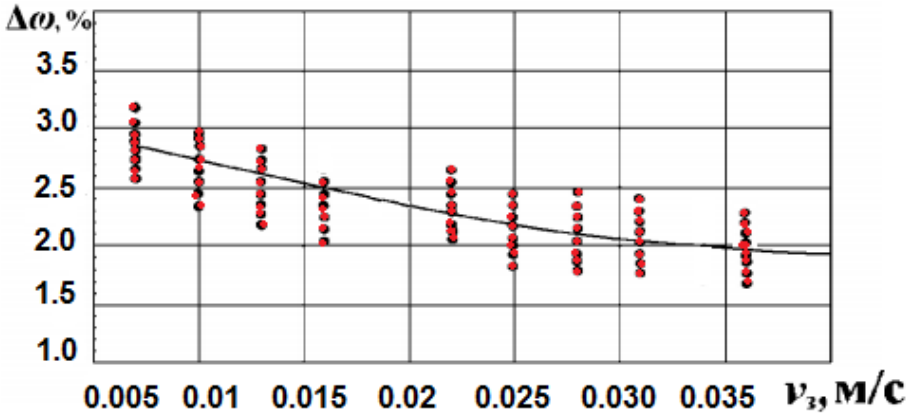

Рисунок 3.2 Залежність вологозйому від швидкості руху зерна

При цьому середня температура нагріваючої поверхні $t_п$=58ºС, швидкість руху повітря $v_в$=5,5 м/с. В даному випадку сумарні питомі затрати теплоти на випаровування із зерна пшениці вологи q складають 3,2 МДж/кг при пропускній здатності установки 250 кг/год.

3.3. Висновок до розділу 3

Забезпечити потрібну якість готового продукту після теплової обробки зерна можливо при здійсненні контактного нагрівання одиничного шару сипучого матеріалу в теплоізольованому кожусі при постійному перемішуванні зерна і видаленні водяної пари, що утворюється.

ВИСНОВКИ

Важливим науковим завдання в галузі енергозбереження – це розробка та впровадження у сільськогосподарське виробництво енергоефективних технологій та відповідних засобів механізації.

Проте, забезпечення необхідного рівня рентабельності виробництва зерна сільськогосподарськими підприємствами подібного типу можливе лише під час використання енергоефективних установок для післязбиральної обробки зерна.

Одним із перспективних напрямів розвитку засобів механізації процесу сушіння зерна є створення малогабаритних контактних установок для теплової обробки зерна, що дозволяють проводити передпосівну обробку, сушіння та знезараження зерна.

Застосування контактного електронагріву для передачі теплоти зерну дозволить отримати максимальну відповідність установок технологічним вимогам при експлуатації в умовах невеликого господарства.

Отримані теоретичні закономірності відображають основні характерні особливості, що мають місце у зерносушильних установках процесу контактного сушіння тонкого шару зерна. Ці закономірності можна використовувати для розрахунку температурного поля всередині шару матеріалу в процесі контактного сушіння, а також для розрахунку інших показників процесу тепломасообміну.

При цьому товщина зернового шару повинна трохи перевищувати максимальний розмір висушуваного зерна, так як це дозволить збільшити коефіцієнт тепловіддачі в декілька разів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2007. - 76 с.
2. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.І. Сушіння зерна: Підручник. К.: Либідь, 1997. 320 с.
3. Станкевич, Г. Оперативне зерносушіння // The Ukrainian Farmer. 2011. № 3. С. 18-20.
4. Малежик І.Ф., Марценюк О.С. Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування. – Київ. НУХТ .2012.
5. Замицький О.В., Омельчук Д.В. Аналіз існуючих способів сушки тонкодисперсних матеріалів // Гірничий вісник, вип. 103, 2018. С. 191-197.
6. Патент на корисну модель 97303 Україна / Радіаційноконвективна сушильна установка / Дубковецький І.В., Малежик І.Ф., Бурлака Т.В., Стрельченко Л.В.
7. Конвективне сушіння неоднорідних сільськогосподарських матеріалів / В. Ф. Дідух // Зб. наук. праць. – К.: Видавництво НАУ. - 2000. − Т. IX. − С. 8 − 11.
8. Науково-методологічні аспекти енергозбереження у харчових технологіях / О. Г. Бурдо, В. Г. Терзієв, О. В. Зиков, С. Гайда // Вісник Державного університету “Львівська політехніка” : Проблеми економії енергії. – 1999. - № 2. − С. 25-28.
9. Озарків І. М. Основи аеродинаміки і тепломасообміну: навч. посіб. / І. М. Озарків, Л. Я. Сорока, Ю. І. Грицюк. – К. : ІЗМН, 1997. – 280 с.
10. Моделювання процесу сушіння окремої зернини пивної дробини в киплячому шарі продукту / Н. М. Лавріненко, В. О. Сукманов, Г. І. Русланов, О. В. Гура // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2006. – № 10 (104). – С. 123–130.
11. Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна / Ю. Ф. Снєжкін, В. М. Пазюк, Ж. О. Петрова, Д. М. Чалаєв. – Київ : Поліграф-Сервіс, 2012. – 154 с.
12. Гапонюк І. І. Удосконалення технології сушіння зерна : монографія / І. І. Гапонюк. – Одеса : Поліграф, 2009. – 182 с.
13. Shydlovska, A.K., Vikhoreiev, Yu.O., Hinailo, V.O. (2003), Energy resources and flows [Enerhetychni resursy i potoky], Ukrainian Encyclopedic Knowledge, Kyiv, 472 p.
14. https://new-elevator.com.ua/products/obladnannya-dlya-sushinnya-zerna/
15. https://uprom.info/news/yak-praczyuye-sushylna-mashyna-prynczyp-diyi-ta-funkczional/

16. Burdo, O.G. (2007) Evolyutsiya sushil'nykh ustanovok . Odessa, 368.

17. http://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/5545/1/5-8-29%20%D0%A1%D1%82%D1%83%D0%B4%20%D0%BA%D0%BE%D1%84_2017.pdf

18. Подпрятов Г. І. Зберігання і переробка продукці рослинництва / Г. І. Подпрятов, Л.Ф. Скалецька, А.М. Сеньков, В.С. Хилевмич. – К. : Мета, 2002. – 495 с.

19. https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/712/sushinnya

20. Hideo INABA / Heat and Mass Transfer Analysis of Fluidized Bed Grain Drying/ Hideo INABA, Syahrul HUSAIN, Akihiko HORIBE and Naoto HARUKI // Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, Vol.41, pp.52-62, January, 2007.

21. Кіндзера Д. П., Ханик Я. М., Атаманюк В. М. Гідродинамічні особливості при сушінні дисперсних матеріалів у щільному шарі //Науковий вісник УкрДЛТУ: Збірник наук.-техн. праць.- Львів: 2003.- Вип.13.1.- С.126-133.