

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**«Обґрунтування енергозберігаючих засобів механізації теплової
обробки насіння соняшника»**

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-4-24
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

_____Петрунін Ігор Андрійович

Керівник: _____ Золотовська Олена Володимирівна

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: тракторів і сільськогосподарських машин

Освітній ступінь: "Магістр"

208 "Агроінженерія"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ТСГМ

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

”_____” _____ 20__ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Петрунін Ігор Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування енергозберігаючих засобів механізації теплової обробки насіння соняшника

керівник роботи к.т.н., доцент Золотовська Олена Володимирівна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“24” жовтня 2025 року №3182

2. Строк подання студентом роботи 29.11.2025 р

3. Вихідні дані до роботи 1. Сучасний стан техніки та технологій очистки зерна, аналіз джерел та обґрунтування дослідження з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Сучасний стан техніки та технологій очистки зерна. 2. Теоретичне обґрунтування дипломної роботи. 3. Обґрунтування методики проведення та результатів експериментальних досліджень 4. Охорона праці та захист навколишнього середовища. 5. Техніко-економічна оцінка ефективності розробленого комбінованого агрегату. Висновок. Список літератури.

5 Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і предмет досліджень. (2 аркуш, А4).

2. Огляд і аналіз конструкцій (1 аркуш, А4). 3. Теоретичні дослідження (2 аркуші, А4). 4. Експериментальні дослідження (2 аркуші А4)

5. Економічна частина. (1 аркуш 4А)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Золотовська О.В., доцент		
2	Золотовська О.В., доцент		
3	Золотовська О.В., доцент		
4	Золотовська О.В., доцент		
5	Золотовська О.В., доцент		
Нормо-контроль	Теслюк Г.В., завідувач кафедри		

7. Дата видачі завдання 30.03.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз технічних рішень	до 27.05.25 р	
2.	Виконання теоретичних досліджень	до 30. 06.25 р	
3	Виконання експериментальних досліджень	до 8.09.25 р.	
4	Охорона праці	до 06.11.25 р.	
5	Економічна частина	до 20.11.25 р.	
6.	Демонстраційний матеріал	до 23.11.25 р.	

Студент

_____ (підпис)

Петрунін І.А

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Золотовська О.В.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Петрунін І.А. Обґрунтування енергозберігаючих засобів механізації теплової обробки насіння соняшника / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Дипломна робота присвячена дослідженню та вдосконаленню контактних установок для теплової обробки зерна з метою підвищення енергоефективності та якості продукту. Проаналізовано сучасні типи сушарок, визначено оптимальні режими сушіння та конструктивно-режимні параметри контактного нагріву тонкого шару зерна.

Експериментальні дослідження на лабораторному стенді УТОЗ показали, що оптимальні параметри роботи установки (температура гріючої поверхні 130 °С, швидкість руху повітря 2,83 м/с, швидкість руху зерна 0,0068 м/с, експозиція - 184 с) забезпечують мінімальні питомі витрати теплоти (3,46 МДж/кг) та рівномірне сушіння без погіршення посівних якостей зерна.

Результати роботи можуть бути використані для оптимізації та конструювання компактних, енергоефективних установок для сушіння та термічного знезараження зерна в малих та середніх фермерських господарствах.

Ключові слова: тепла обробка зерна, контактна сушарка, енергоефективність, рівномірність нагріву, питомі витрати теплоти, пропускна здатність

ЗМІСТ

Вступ	7
1 ОБГРУНТУВАННЯ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСОБІВ МЕХАНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА	10
1.1 Властивості зерна як об'єкта теплового впливу	10
1.2 Оптимальні режими сушіння зерна	11
1.3 Аналіз конструкцій і класифікація засобів механізації процесу сушіння зерна	13
2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У КОНСТРУКЦІЇ КОНТАКТНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА	31
2.1 Конструктивно-технологічна схема установки контактної типу для теплової обробки зерна	31
2.2 Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів транспортуючого робочого органу установки контактної типу	34
2.3 Тепловий баланс засобів механізації теплової обробки зерна	42
3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБРОБКА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	46
3.1 Лабораторний стенд дослідження процесів теплової обробки зерна	46
3.1.1 Дослідження теплової обробки насіння соняшника	48
3.1.2 Дослідження теплової обробки зерна пшениці	50
3.2 Обґрунтування результатів дослідження	51
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	60
4.1. Загальні положення	60
4.2. Характеристика умов праці при експлуатації УТОЗ	61
4.3. Вимоги безпеки під час експлуатації установки	61
4.4 Охорона навколишнього середовища	64
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕХАНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ	66
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72

ВСТУП

Теплова обробка сировини є одним із основних видів впливу в аграрному виробництві, частка якого у загальному світовому споживанні енергетичних ресурсів перевищує 40 %. Практично всі сільськогосподарські матеріали під час виробництва та переробки піддають тепловому впливу, зокрема сушінню, варінню, смаженню, термічному знезараженню, стерилізації, пастеризації тощо.

Одним із стратегічно важливих видів продукції сільського господарства в Україні є зерно. У структурі виробництва основних продуктів рослинництва на зернові культури припадає близько 50 % загального обсягу виробництва. Щорічний валовий збір зернових культур перевищує 100 млн тонн. Продукти переробки зерна містять майже всі необхідні для людини поживні речовини: вуглеводи (82–83 %), білки (14–15 %), жири (2,0–2,5 %), а також фосфор, калій, магній, кальцій та інші мінеральні елементи. Хлібні та круп'яні вироби забезпечують людину значною часткою необхідної енергії, білків і вітамінів, при цьому рослинні білки значно дешевші за білки тваринного походження. Крім того, зерно є сировиною для виробництва цінних продуктів, таких як крохмаль, харчові концентрати, а також основним компонентом комбікормів.

Теплові процеси, що відбуваються із зерном, зумовлені комплексом взаємопов'язаних теплофізичних, фізико-хімічних та біохімічних процесів. Одним із найважливіших та енергоємних видів теплового впливу є післязбиральна сушка зерна. Внаслідок цього процесу зернові продукти значно покращують свої якісні показники та підвищують стійкість при зберіганні чи тимчасовій консервації.

Для ефективного вирішення завдань сушіння особливого значення набуває удосконалення існуючих технологій та засобів механізації процесів зберігання, обробки та переробки зерна. Раціональна організація цих процесів у технологічному та економічному плані дозволяє зменшити втрати, підвищити збереження та поліпшити якість оброблюваного продукту, забезпечуючи мінімізацію витрат усього виробничого циклу.

Незважаючи на складність і високу вартість післязбиральної обробки зерна в масштабах країни, досвід передових аграрних підприємств показує, що виробництво високоякісного зерна економічно вигідне, а рівень рентабельності становить не менше 40 %. Зростаючий попит на нову техніку для післязбиральної обробки зерна та збільшення валових зборів потребує розробки та впровадження високоефективних технічних засобів, що відповідають сучасному рівню розвитку технологій і створені на основі науково обґрунтованих положень.

Серійно випускаються пристрої для теплової обробки зерна орієнтовані на високу продуктивність, що часто перевищує 100 т/год, і їхнє використання для переробки невеликих партій зерна у фермерських господарствах є економічно недоцільним. Перспективними є мініустановки, що мають невелику споживану потужність, високу економічність, прості у експлуатації та технічному обслуговуванні, здатні виконувати кілька технологічних операцій і характеризуються відносно низькою вартістю.

Використання традиційного конвективного способу подачі тепла до зерна в таких установках є малоефективним через складність забезпечення необхідного рівня енергоефективності. Крім того, більшість конвективних зерносушарок не відповідають екологічним вимогам: для сушіння 1 т зерна знижують його вологість на 6 % у середньому потрібно спалити близько 60 кг рідкого палива, при цьому в атмосферу виділяється до 2 кг шкідливих речовин, що погіршує умови праці персоналу та стан навколишнього середовища.

Метою досліджень – підвищення ефективності процесів теплової обробки зерна шляхом обґрунтування енерго- та ресурсозберігаючих засобів механізації.

Об'єкт досліджень – технологічні процеси теплової обробки зерна, зокрема сушіння

Предмет досліджень – закономірності технологічних процесів теплової обробки зерна, що дозволяють оптимізувати конструктивно-режимні параметри засобів механізації.

Таким чином, актуальним завданням є розробка ефективних, економічних і екологічно безпечних технічних засобів теплової обробки зерна, що дозволяють покращити якість продукції, зменшити енергетичні витрати та підвищити безпеку праці.

1 ОБГРУНТУВАННЯ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСОБІВ МЕХАНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА

1.1 Властивості зерна як об'єкта теплового впливу

Тепловий вплив на зерно є складним технологічним процесом. Для створення інноваційних та енергоефективних конструкцій засобів механізації, які реалізують цей вплив, необхідно враховувати властивості зерна та забезпечувати задані вихідні параметри обробленої сировини, такі як кінцева вологість та максимальна температура нагріву.

До основних фізичних, фізико-хімічних та теплофізичних властивостей зерна належать: вологість, гігроскопічність, форма, лінійні розміри, крупність, об'єм, щільність, рівномірність, маса 1000 зернин, стекловидність, наявність плівок, натура, схожість насіння, енергія проростання, механічні властивості, вміст білка, клейковини, допустима температура нагріву, теплоємність, теплопровідність, сыпучість, аеродинамічний опір та швидкість зважування.

Залежно від вологості зерно поділяють на сухе, середньої сухості, вологе та сире (табл. 1.4). Тривале зберігання зерна неможливе без різкого погіршення якості, якщо його вологість перевищує значення «сухого» та «середньої сухості». У «вологому» та «сирому» зерні відбуваються негативні процеси – розвиток шкідливих мікроорганізмів і підвищення інтенсивності дихання, що може призвести до самонагрівання та псування.

Влагообмін між зерном та навколишнім повітрям відбувається постійно. Він може йти у двох напрямках:

- десорбція – передача вологи від зерна до повітря, коли парціальний тиск водяних парів на поверхні зерна вищий за тиск у повітрі;
- сорбція – поглинання вологи зерном з повітря, коли парціальний тиск водяних парів на поверхні зерна менший за тиск у повітрі.

Важливим обмежуючим фактором режимів сушіння є максимально допустима температура нагріву зерна, яка залежить від його початкової вологості. Чим більше в зерні вільної води, тим менша його термостійкість.

Наприклад, при вологості гороху та рису 18 % температура нагріву не повинна перевищувати 45 °С, а агента сушіння – 60 °С. Для зерна з вологостю понад 25 % допустимі температури ще нижчі. Зерно пшениці для хлібопекарських потреб допускається нагрівати до 48–50 °С, а жита – до 60 °С.

Одним із ключових теплофізичних показників зерна є його термостійкість, що характеризує здатність зберігати властивості під час сушіння. Також важливими показниками є:

– теплопровідність – здатність зерна передавати тепло через контакт зернин або завдяки конвекції; для пшениці коливається в межах 0,120–0,140 Вт/(м·°С) і залежить від вологості;

– температуропровідність – характеризує швидкість зміни температури у матеріалі, тобто його теплоінерційні властивості; для зернової маси становить $1,7 \cdot 10^{-7}$ – $1,9 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Врахування цих властивостей є необхідним для оптимального обґрунтування режимів теплової обробки та розробки ефективних засобів механізації.

1.2 Оптимальні режими сушіння зерна

Для збереження якості оброблюваного зерна необхідно підтримувати оптимальний режим його сушіння, тобто встановлювати найбільш ефективні значення температури та часу теплового впливу, вологості та швидкості руху агента сушіння.

Якість зерна продовольчого призначення оцінюють за наявністю тріщин, кількістю та якістю (густотою) клейковини, кольором і запахом. Основними показниками якості насіннєвого зерна є енергія проростання та схожість [1, 2].

Сушіння, проведене у встановлені строки та з дотриманням необхідних технологічних вимог, покращує збереженість зерна, а також його продовольчі та насіннєві властивості. Воно сприяє прискоренню післязбирального

дозрівання, вирівнюванню вологості та покращенню технологічних властивостей. Сушка також підвищує вихід і якість продукції при переробці зерна у борошно та крупу, покращуючи властивості дефектного зерна, зокрема морозобійного, пророслого або пошкодженого шкідниками [3].

На вибір режиму сушіння впливають спосіб збирання та ступінь зрілості зерна, а також початкова якість клейковини. Зерно з міцною клейковиною витримує менший нагрів, ніж зерно зі слабкою клейковиною [4].

При виборі режимів сушіння важливо зберегти біологічно активні речовини (ліпіди та їх похідні), що визначають поживні властивості зерна. Якість обробленого зерна залежить від механізму переносу вологи. Ідеальним є режим сушіння, при якому зона випаровування розташована поблизу поверхні зерна, волога переміщується у вигляді рідини, а перегрів поверхні виключається [5].

Режими сушіння круп'яних культур передбачають нижчі температури агента сушіння та нагріву зерна. Технологічна цінність круп'яних культур визначається, перш за все, виходом та якістю крупи, на які істотно впливає тріщинуватість зерна. Тому оптимальний режим сушіння забезпечує мінімальне утворення тріщин.

Для зерна продовольчого призначення у шахтних прямотокових та рециркуляційних сушарках рекомендовані режими сушіння залежать від початкової вологості зерна та його якості [6, 7]. Наприклад, для пшениці насіннєвого призначення при початковій вологості 20 % температура агента сушіння повинна бути 40 °С, а температура нагріву зерна – 40 °С; при вологості 30 % – відповідно 60 °С і 38 °С.

Особливо важливо враховувати конструкцію сушарки та спосіб організації процесу: прямиотічний, рециркуляційний чи ізотермічний. У рециркуляційних сушарках із падаючим зерновим шаром температуру агента сушіння підтримують у межах 60–80 °С, що забезпечує рівномірне прогрівання та збереження якості зерна [8].

Правильно підібрані режими сушіння при експлуатації зерносушарок дозволяють забезпечити необхідну якість оброблюваного продукту та враховують призначення зерна – продовольче чи насіннєве. Вибір режимних параметрів також залежить від виду зернової культури та конструкції теплової камери [9].

Таблиця 1.1

Оптимальні режими сушіння зерна пшениці та інших культур

Культура	Початкова вологість, %	Температура агента сушіння, °С	Температура нагріву зерна, °С	Примітки
Пшениця (насіннєва)	20	40	40	Шахтні рециркуляційні сушарки
Пшениця (насіннєва)	26	50	39	Шахтні рециркуляційні сушарки
Пшениця (насіннєва)	30	60	38	Шахтні рециркуляційні сушарки
Пшениця (продовольча)	18–20	60–80	48–50	Прямотокові та рециркуляційні сушарки
Ячмінь (пивоварний)	18–22	60–70	40–45	Рециркуляційні сушарки
Рис	18–20	60	45	Прямотокові сушарки
Горох	18	50–60	45	Рециркуляційні сушарки
Кукурудза (зерно)	18–20	60–70	50	Рециркуляційні сушарки
Кукурудза (в качанах)	20–25	50–60	45–50	Шахтні прямотокові сушарки

1.3 Аналіз конструкцій і класифікація засобів механізації процесу сушіння зерна

Для освоєння досвіду створення конструкцій зерносушарок та оцінки їх відповідності основним технологічним і економічним вимогам необхідно провести класифікацію зерносушарок. Основою класифікації можуть бути різні показники: продуктивність, металомісткість, конструктивні особливості,

спосіб подачі енергії, спосіб видалення вологи та ін. На рисунку 1.13 наведена класифікація установок для сушіння зерна.

Основним класифікаційним критерієм, який істотно впливає на конструктивно-технологічну схему та ефективність використання енергії, є спосіб подачі теплоти до зерна.

Розглянемо детальніше групи зерносушарок, конструкції яких отримали найбільше поширення на практиці.

Найчисленнішою за різноманіттям конструкцій є група зерносушарок з конвективним способом подачі теплоти. У таких установках агент сушіння одночасно виконує роль теплоносія та поглинача вологи. Зерносушарки цього типу в основному класифікують за конструкцією робочої камери: барабанні, шахтні, карусельні, стрічкові тощо.

Барабанні зерносушарки широко використовуються для сушіння зерна злакових культур, соняшника та інших. У сільському зерновому виробництві застосовують як стаціонарні, так і пересувні барабанні сушарки. До стаціонарних відносять установки СЗСБ-8, СЗСБ-8А, СЗСБ-8М, до пересувних – СЗПБ-2,5.

Основним елементом барабанних зерносушарок є горизонтальний або трохи нахилений циліндричний барабан, який обертається зі швидкістю 2–6 об/хв. Усередині барабана, залежно від виду оброблюваного зерна, встановлюють насадки різної форми або поздовжні лопаті, що сприяють інтенсифікації процесу теплового впливу (рис. 1.1).

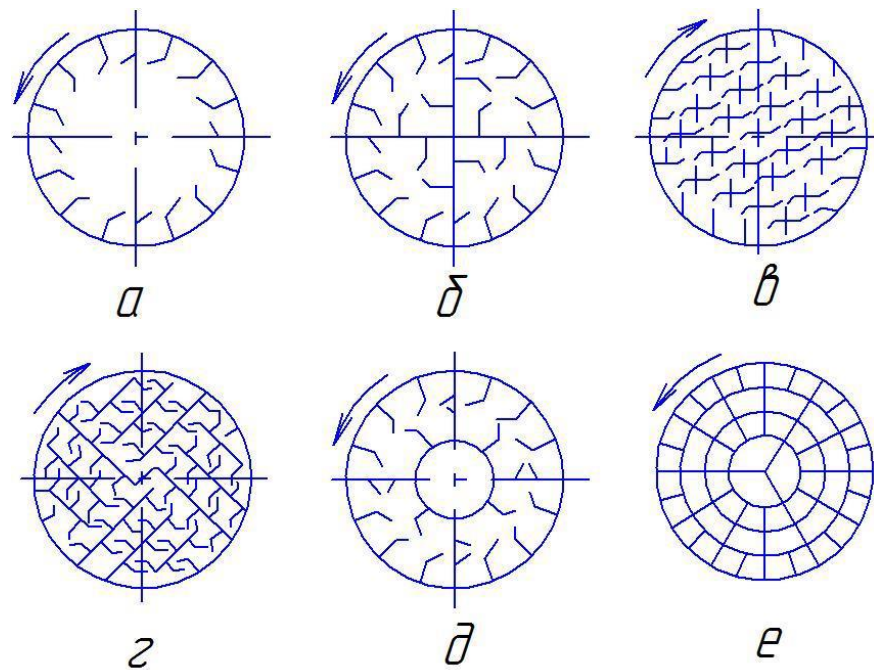


Рисунок 1.1 – Схеми внутрішніх насадок у барабанних зерносушарках:
 а) підйомно-лопатеві; б) секторні; в) і г) розподільні; д) комбіновані;
 е) перевальні (із закритими осередками).

При обертанні барабана насадки захоплюють оброблюване зерно, яке під дією сили тяжіння спадає вниз, контактуючи при цьому з агентом сушіння, що проходить через барабан.

Залежно від конструкції та розташування насадок заповнення об'єму барабана зерносушарки становить 20–25 %.

Основною характеристикою барабанних зерносушарок, як і багатьох інших, є вологонапруга, тобто кількість випарованої вологи з 1 м³ об'єму барабана. Цей показник зазвичай використовують при розрахунках габаритів сушильних камер. Значення вологонапруга для барабанних зерносушарок коливається від 6 до 44 кг вип. вл/(м³·год) і залежить від типу, ступеня заповнення та частоти обертання барабана, теплофізичних властивостей і розмірів висушуваного зерна, а також від температури, вологості та швидкості агента сушіння всередині барабана. Для шахтних зерносушарок значення вологонапруга становить 30–50 кг вип. вл/(м³·год) [1].

Барабанна зерносушарка СЗСБ-8 призначена для сушіння різних зернових та олійних культур будь-якої вологості та забрудненості без попереднього очищення. Основними конструктивними елементами цієї сушарки є топка, завантажувальна камера, сушильний барабан, розвантажувальна камера, охолоджувальна колонка, розвантажувальна норія, вентилятор охолоджувальної колонки, вентилятор сушильного барабана, завантажувальна норія та привідний механізм.

Принципова технологічна схема роботи зерносушарки наведена на рисунку 1.2

Зерно потрапляє через завантажувальну камеру у сушильний барабан СЗСБ-8, де лопатки барабана і хрестовини підхоплюють зерно, піднімають його вгору, після чого воно спадає вниз і далі переміщується вздовж барабана.

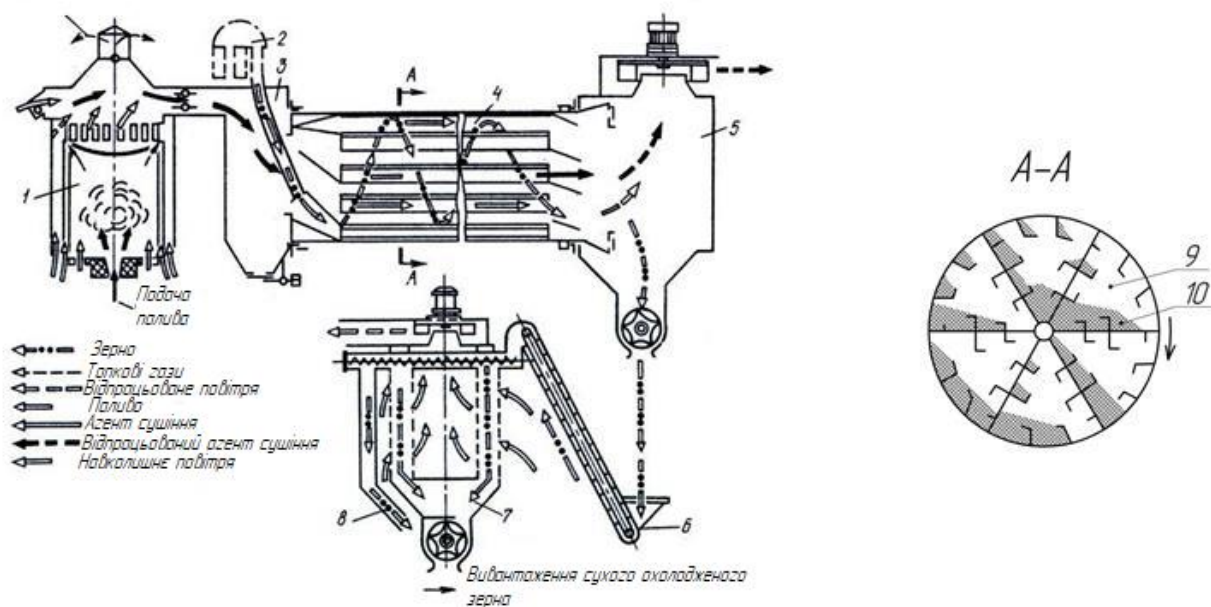


Рисунок 1.2 – Технологічна схема зерносушарки СЗСБ-8:

- 1 – топка; 2 – завантажувальна норія; 3 – завантажувальна камера; 4 – барабан; 5 – розвантажувальна камера; 6 – розвантажувальна норія; 7 – охолоджувальна колонка; 8 – труба контрольного висипу; 9 – зона конвективного сушіння; 10 – зона контактного сушіння.

Зерно після теплового впливу безперервно через шлюзовий затвор виводять із розвантажувальної камери за допомогою норії в охолоджувальну

колонку. Тут зерно переміщується зверху вниз і охолоджується продуваним атмосферним повітрям. Повітря для охолодження надходить ззовні по всій висоті перфорованої частини колонки, проходить через шар зерна до внутрішнього циліндра і видаляється в атмосферу.

Рух зерна в колонці порційно-періодичний. При досягненні верхнього рівня зерно тисне на мембрану датчика верхнього рівня, який вмикає електродвигун шлюзового затвора, що випускає охоложене зерно. Коли рівень зерна знижується до датчика мінімального рівня, електродвигун вимикається і розвантаження припиняється. Потім рівень зерна знову підвищується, і цикл повторюється.

Барабанні зерносушарки простіші в обслуговуванні і менш вимогливі до очистки оброблюваного зерна від сторонніх домішок.

До основних недоліків барабанних зерносушарок належать: велика металомісткість (удельна металомісткість барабанних сушарок становить 1400–2100 кг·год/т), потреба у використанні окремого охолоджувача для обробленого зерна, а також підвищені витрати енергії (сумарні питомі витрати теплоти на випаровування вологи з зерна складають 5,23–12,5 кДж/кг, при цьому частка електричної енергії зазвичай не перевищує 2 %).

Шахтні зерносушарки поділяють на прямоточні та рециркуляційні. За способом формування зернового шару вони можуть бути колонковими, жалюзійними або з коробами.

Різні групи шахтних сушарок за способом подачі агента сушіння до зернового шару можна розділити на підгрупи:

- а) з одностороннім рухом потоку теплоносія (по товщині шару);
- б) із зміною напрямку потоку теплоносія на зворотний (по товщині шару);
- в) із зміною напрямку потоку теплоносія (по ширині шару);
- г) із примусовим перемішуванням зернового шару по товщині.

Прямоточні шахтні зерносушарки безперервної дії застосовують для сушіння пшениці, жита, ячменю, кукурудзи, насіння соняшнику та інших культур продовольчого та посівного призначення. У шахті зерно під дією сили

тяжіння рухається зверху вниз і пронизується агентом сушіння. Швидкість руху зерна обмежується випускним механізмом періодичної або безперервної дії. Продуктивність таких зерносушарок коливається від 1 до 120 т/год [1].

Максимально допустимі значення питомого споживання теплової та електричної енергії для випаровування вологи зі зерна шахтних сушарок наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Показники максимально допустимого споживання енергії для шахтних зерносушарок

Вид палива	Вид використовуваної енергії	Питома витрата енергії, МДж/кг вологи	
		при сушінні продовольчого зерна	при сушінні насінневого зерна
Рідке і газоподібне	теплова	4,2	5,2
	електрична	0,36	0,54
	сумарна	4,56	5,74
Тверде	теплова	4,8	6,6
	електрична	0,42	0,63
	сумарна	5,22	7,23

Проте на практиці ці показники значно перевищують нормативні значення: сумарні питомі витрати енергії на випаровування вологи у шахтних сушарках становлять 5,1–7,1 МДж/кг для продовольчого зерна і 6,5–8,5 МДж/кг для насінневого зерна [11].

Металомісткість технологічно досконалих шахтних сушарок становить 1300–1550 кг·год/т, проте у найбільш поширених моделей цей показник перевищує 2200 кг·год/т.

Технологічна схема роботи шахтних рециркуляційних зерносушарок включає: попередній нагрів вологого зерна, змішування його з підсушеним

(рециркулюючим), контактний тепло- та вологообмін між цими потоками зерна, сушіння та охолодження зерна.

Попередній нагрів сирого зерна дозволяє випаровувати приблизно 1/4 загальної кількості води, зменшуючи тим самим кількість циклів рециркуляції. Це підвищує ефективність передачі води, прискорює процес сушіння, оскільки його можна проводити при граничних температурах нагріву. Крім того, рециркульоване зерно не піддається проміжному охолодженню, що дозволяє знизити витрати енергії на процес сушіння [2, 9].

Використання рециркуляційних зерносушарок дозволяє сушити зерно різної початкової вологості, що усуває необхідність формування партій зерна за вологістю. Завдяки цьому досягається необхідна кінцева вологість за один прохід через сушарку (знім води за один цикл сушіння досягає 12–14 %).

Принцип роботи сушарки такого типу полягає у наступному. Попередньо очищений зерновий матеріал подається двопоточними норіями у шахту (шахти) сушарки. Через зерновий шар проходять потоки підігрітого повітря, що засмоктуються вентилятором та рівномірно надходять із підвідних коробів. Над кожним рядом підвідних коробів розташований ряд відвідних коробів. Короба виконані шатроподібними та відкритими знизу, розташовані в шаховому порядку.

Вертикальні перегородки, встановлені над коробами, ділять надходяче зерно на окремі потоки, що забезпечує рівномірний рух зерна по висоті шахти та виключає утворення застійних зон. Відпрацьований теплоносій відсмоктується вентилятором через відвідні короби та направляється у циклон для очищення. Час перебування зерна у шахті регулюють розвантажувальним пристроєм на виході сушарки.

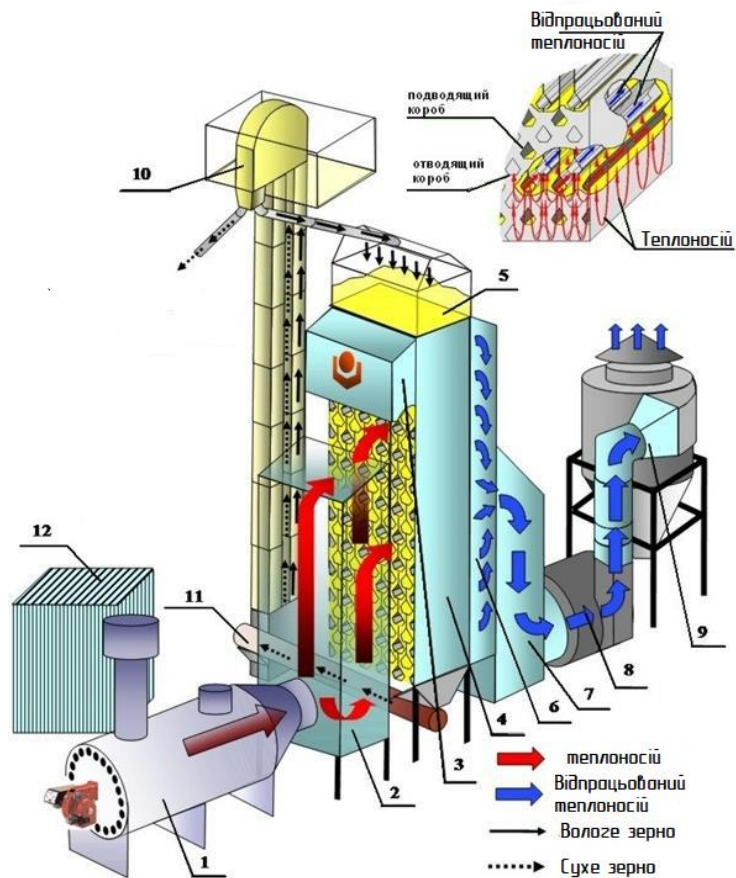


Рисунок 1.3 – Схема роботи зерносушарки типу С:

1 – теплогенератор; 2 – підвідний канал; 3 – канал подачі теплоносія; 4 – шахта; 5 – надсушильний бункер; 6 – канал відведення теплоносія; 7 – сполучний канал; 8 – вентилятор; 9 – аспіраційна система; 10 – двопотокова норія; 11 – розвантажувальний шнековий конвеєр; 12 – робоче місце оператора.

Зерно зі сушарки шнековим конвеєром подають у другий потік норії та далі направляють або у ємність для сухого зерна, або повторно у шахту. Залежно від початкової вологості зерна його сушку здійснюють трьома способами (рисунок 1.4).

Шахта по вертикалі поділена на три зони: дві зони сушіння (I та II) і одну зону охолодження (III). У першій зоні сушіння регулювання температури теплоносія здійснюється форсункою теплблоку. Тут із вологого зерна видаляється поверхнева волога. У другій зоні видаляється внутрішня (капілярна) волога при меншій температурі, ніж у першій зоні, яку регулюють

відкриванням заслінок у підвідному каналі. У третій зоні відбувається охолодження зерна після сушіння. Третю зону за допомогою декількох заслінок можна перевести в зону сушіння, що дозволяє збільшити продуктивність зерносушарки майже на 25 %

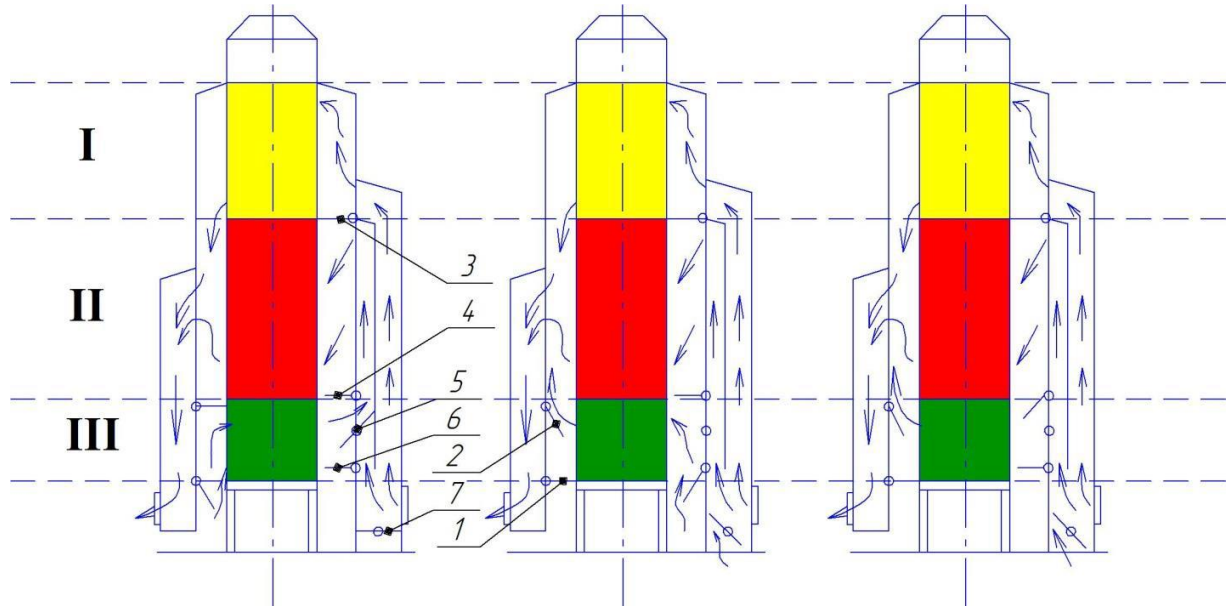


Рисунок 1.4 – Технологічні схеми роботи зерносушарки типу С:
 а – сушіння зерна з рециркуляцією повітря з зони охолодження, включення його в потік теплоносія; б – сушіння зерна з викидом повітря з зони охолодження разом із відпрацьованим теплоносієм; в – сушіння зерна при багаторазовому проході через сушарку або охолодженні його у вентиляльованих бункерах, причому зону охолодження переводять у зону сушіння;
 Зони сушарки: I – зона попереднього нагріву; II – зона сушіння; III – зона охолодження.
 Заслінки: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – регулюють потік теплоносія та рециркуляційного повітря.

Камерні сушарки коридорного та секційного типів в основному використовують для сушіння кукурудзи в качанах.

Сортові насіння кукурудзи в качанах сушать у камерних сушарках у щільному, нерухомому шарі, який продувають сумішшю топкових газів з повітрям (агентом сушіння) безперервно або періодично.

Сушарки коридорного та секційного типів відрізняються конструкцією та розташуванням сушильних шахт, розподільних коридорів, вентиляційного обладнання, топків і схемою руху агента сушіння.

Розрізняють чотирьох-, шестикамерні, восьми- або десяткамерні зерносушарки. Продуктивність залежить від кількості камер, ступеня їх завантаження та обсягу подачі агента сушіння.

Качани кукурудзи завантажують у сушильні камери та сушать у нерухомому шарі, пропускаючи через нього агент сушіння по черзі знизу вгору та зверху вниз. Тривалість сушіння кукурудзи в качанах становить близько 120 годин при початковій вологості зерна 42...45 % та кінцевій – 13...13,5 %.

Усі сушарки коридорного типу (рис. 1.5) складаються, як правило, із сушильного та топкового приміщення (безпосередньо сушарки та топки) і являють собою окремі споруди, оснащені вентиляційним, енергетичним (топковим), транспортним та іншим обладнанням

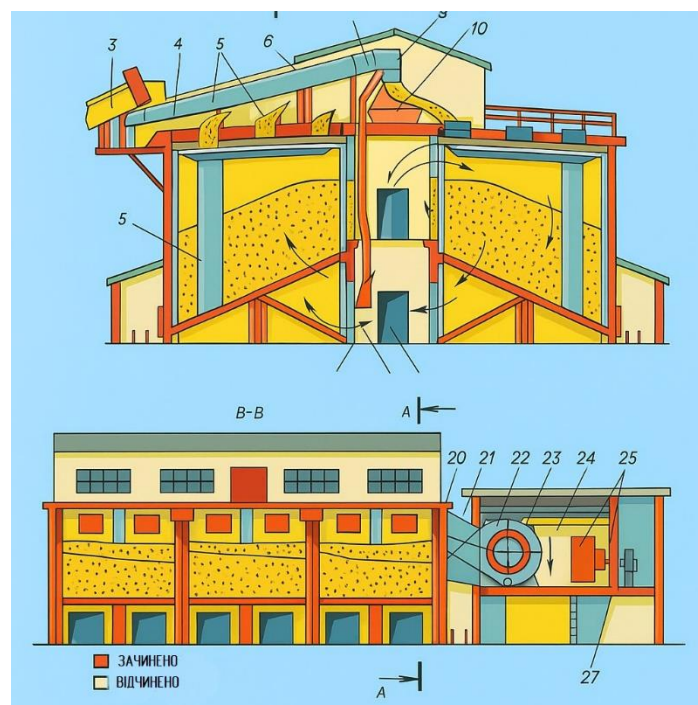


Рисунок 1.5 – Камерна сушарка СКП-6:

1 – сушильна камера; 2 – ситове днище; 3 – скребковий конвеєр; 4 – стрічковий конвеєр; 5 – люки для виходу відпрацьованого агента сушіння; 6 – завантажувальний люк; 7 – розподільник потоку висушеного матеріалу; 8 – реверсивний конвеєр; 9 – завантажувальний лоток; 10 – люк; 11 – розвантажувальний конвеєр; 12, 13 – двері; 14 – пересувна сушарка; 15 – нижній розподільний коридор; 16 – верхній розподільний коридор; 17 – розвантажувальний люк; 18 – кришка люка; 19 – галерея; 20 – лебідка; 21 – дифузор; 22 – клапан; 23 – вентилятор низького тиску; 24 – топка; 25 – циліндри топки; 26 – жалюзійна решітка.

Основною перевагою камерних зерносушарок є простота конструкції та відносно низька вартість їх виготовлення. Проте, незважаючи на це, технологія сушіння в таких апаратах досить недосконала. Процес сушіння відбувається при подачі агента через перфоровану стінку в шар зерна та відведенні відпрацьованого агента через іншу перфоровану стінку. При такій схемі зерно, що прилягає до стінки зі сторони подачі агента, пересушується, тоді як біля протилежної стінки не досягається необхідний рівень сушіння.

Для зменшення нерівномірності сушіння застосовують агент із нижчою температурою, що, у свою чергу, призводить до підвищеного споживання палива та електроенергії. Так, сумарні питомі енерговитрати на процес видалення вологи із зерна в зерносушарках цього типу перевищують 8,56 МДж/кг. Питома металоємність камерних зерносушарок перевищує 1600 кг·год/т [19].

Слід також відзначити суттєвий недолік, характерний для більшості зерносушарок конвективного типу – невідповідність сучасним екологічним вимогам. Це пов'язано з особливостями використання палива для топок зерносушарок: дрова, торф, вугілля, дизельне паливо, керосин, деревна щепка тощо. Якість палива визначають вмістом у ньому вуглецю (С), водню (Н) та леткої сірки (S).

Чим більший відсотковий вміст цих елементів у паливі, тим більше теплоти виділяється при згорянні, тобто вище його теплотворна здатність. Проте сірка є небажаною й навіть шкідливою домішкою, оскільки при її згорянні утворюється діоксид сірки, що має неприємний їдкий запах і при наявності вологи утворює сірчану кислоту, яка руйнівню діє на металеві частини сушарки та погіршує стан здоров'я обслуговуючого персоналу.

Зерносушарки з контактним способом подачі теплоти до цього часу не знайшли широкого застосування у зерносушінні. Це пов'язано передусім із тим, що при сушінні зерна на нагрітій поверхні воно нагрівається нерівномірно: нижні шари пересушуються, а верхні – недосушуються.

Проте на сьогодні доведено, що цей вид сушіння має перевагу над іншими видами при забезпеченні одношарового шару зерна та постійному перемішуванні або ворошінні оброблюваного матеріалу. Технічно це можна реалізувати, застосовуючи в сушильних установках відповідні робочі органи. Більш перспективними вважаються робочі органи, які дозволяють одночасно поєднувати процеси сушіння та транспортування вихідного матеріалу (винтові або скребкові транспортёри).

На рисунку 1.6 представлена схема контактної зерносушарки.

Зерносушарка складається з діелектричного циліндричного кожуха 1, який має отвори 2 і 3 для охолодження зерна, діаметр яких збільшується до розвантажувального вікна 4, спіраль-вентильного транспортуючого робочого органу 5, розташованого по осі циліндра з можливістю обертання і підключеного до джерела струму за допомогою колекторів 6 та щіток 7.

Кожух оснащений системою охолодження, що включає вентилятор 8 та повітропровід 9 з вікнами 10, який з'єднаний із нижньою перфорованою частиною кожуха під кутом β . Площа вікон 10 збільшується за напрямом руху зерна. Бункер 11 розташований над завантажувальним вікном 10 і обладнаний заслінкою 13. Спіраль-вентильний транспортуючий робочий орган 5 отримує привід від електродвигуна 14 через ремінну передачу 15 та вал 16, який спирається на підшипники 17.

Отвори для видалення вологи розташовані по верхній утворюючій кожуха під кутом α від завантажувального до розвантажувального вікон. Температуру нагріву зерна регулюють зміною напруги, частоти обертання транспортуючого робочого органу, а також подачі матеріалу з бункера.

За результатами дослідження дослідного зразка авторами винаходу встановлено [14, 15], що сумарний питомий витрата енергії у запропонованій сушарці становить 4,3 МДж/кг випареної вологи. Пропускна здатність цієї зерносушарки становить 82 кг/год.

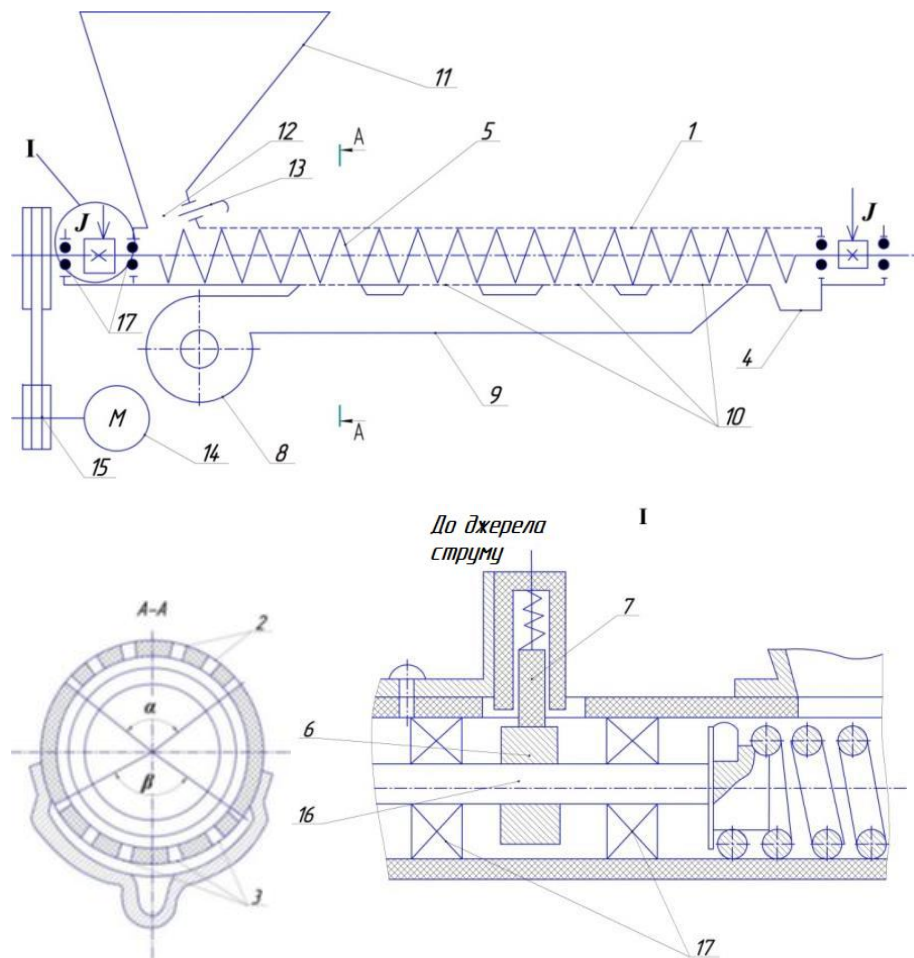


Рисунок 1.6 – Контактна зерносушарка

Контактна зерносушарка (рис. 1.7) працює наступним чином. При потраплянні зерна з завантажувального бункера в кільцевий зазор між перфорованим кожухом і стаканом, зерно захоплюється спіральним транспортуючим робочим органом.

Контактуючи з нагрітими поверхнями перфорованого кожуха та стакана, зерно втрачає вологу. Під час руху повітря охолоджує зовнішню поверхню кожуха, нагрівається і проходить через перфорацію кожуха в зону сушки, де додатково підігріває зерно.

Пропускна здатність цієї зерносушарки, за даними авторів [2], досягає 250 кг/год при сумарних удельних витратах теплоти на процес випаровування вологи з зерна 3,62 МДж/кг.

Окреме місце серед зерносушильного обладнання займають сушарки, що реалізують принцип активного вентилявання зернового шару. У цьому випадку швидкість руху зерна дорівнює нулю, а швидкість повітря не перевищує критичної швидкості зважування зерна оброблюваної культури. Основні параметри таких пристроїв: температура поданого повітря – 30...40 °С, знім вологи – 0,5...1,5 % за годину при удельних витратах теплоти на випаровування вологи з зерна 8...20 МДж/кг. Зерносушарки цього типу мають низький ККД і не забезпечують необхідної рівномірності сушки.

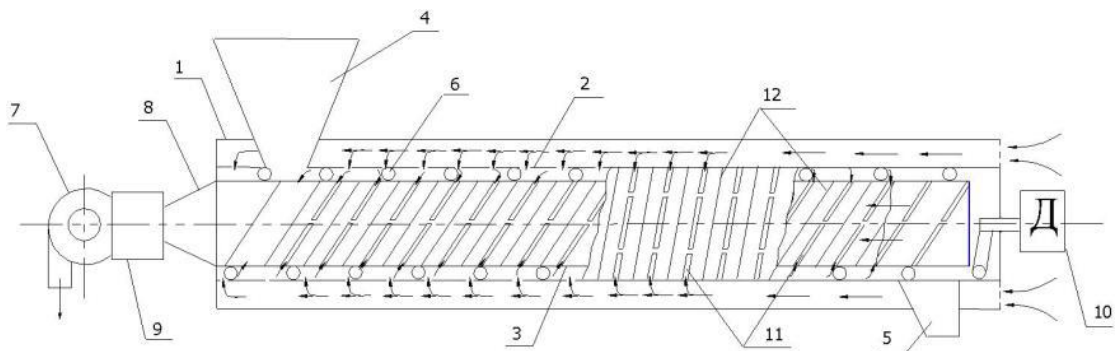


Рисунок 1.7 – Зерносушарка контактної дії

1 – теплоізоляційний корпус; 2 – циліндричний перфорований кожух; 3 – перфорований стакан; 4 – завантажувальний бункер; 5 – вивантажувальне вікно; 6 – транспортує спіраль-гвинтовий робочий орган; 7 – вентилятор; 8 – повітропровід; 9 – фільтр; 10 – привід; 11 – прорізи; 12 – нагрівальні елементи.

Окреме місце в переліку зерносушильного обладнання займають зерносушарки, що реалізують принцип активного вентилявання зернового шару. У цьому випадку швидкість руху зерна дорівнює нулю, а швидкість повітря не перевищує критичну швидкість зважування зерна оброблюваної культури.

Основні параметри таких пристроїв: температура поданого повітря – 30...40 °С, знім вологи – 0,5...1,5 % за годину при удельних витратах теплоти на випаровування вологи з зерна 8...20 МДж/к. Зерносушарки цього типу мають низький ККД і не забезпечують необхідної рівномірності сушки [7, 13, 15].

На рисунку 1.8 представлена схема бункера БВ-40 вітчизняного виробництва. Принцип його роботи наступний: зерно потрапляє в приймальний бункер 11 і рівномірно заповнює простір між корпусом 10 та повітророзподільною трубою 13.

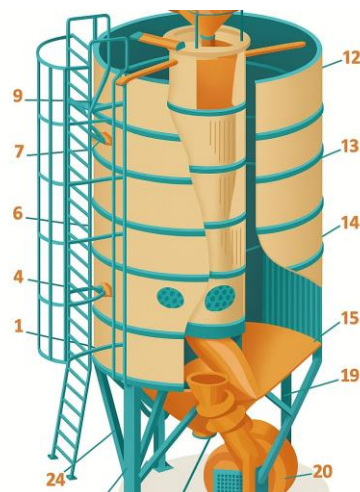


Рисунок 1.8 – Вентильований бункер БВ-40:

- а) загальний вигляд; б) схема: 1 – тяга циліндра; 2 – корпус бункера; 3 – регулятор вологості; 4 – трос; 5 – зовнішня драбина; 6 – пробовідбірник; 7 – датчик рівня зерна; 8 – тросова система; 9 – внутрішня драбина; 10 – корпус; 11 – приймальний бункер; 12 – плаваючий клапан; 13 – труба повітропроводу; 14 – секція корпусу; 15 – корпус; 16 – рама; 17 – патрубок; 18 – вентилятор; 19 – стійка;

20 – електрокалорифер; 21 – заслінка; 22 – зворотний конус; 23 – ручна лебідка; 24 – тумба.

При підсушуванні зерна повітря, підігріте на 3...5 °С вище температури навколишнього середовища, нагнітається вентилятором 18 у повітропровід 13, проходить через шар зерна та виводиться в атмосферу. Коли зерно охолоджується, електрокалорифер 20 вимикають [8, 15].

Таким чином, у сучасному сільському господарстві застосовують різноманітне зерносушильне обладнання, яке відрізняється конструктивно-технологічними схемами виконання. Проведений аналіз конструкцій існуючих пристроїв для теплової обробки зерна показав, що вони розраховані на великі зерновиробничі підприємства, і їх використання при переробці невеликих партій зерна є нераціональним. Випущені промисловістю серійні засоби механізації процесів теплової обробки зерна, орієнтовані на невелику продуктивність, також виявляються неефективними, оскільки в них різко зростають сумарні питомі витрати енергії на нагрів зерна, випаровування з нього вологи та її видалення із сушильної камери.

Відносно низькі сумарні питомі витрати теплоти в установках провідних зарубіжних виробників досягаються, головним чином, за рахунок використання комплексних систем автоматичного регулювання та управління процесами теплової обробки. При цьому суттєвих особливостей реалізації процесів теплової обробки у пропонованій на російському ринку іноземній техніці порівняно з вітчизняними аналогами не спостерігається [6].

Слід зазначити, що відносно невеликі аграрні підприємства (фермерські господарства), які спеціалізуються на виробництві та переробці зерна, і які останнім часом отримали широке поширення в регіонах Росії, потребують інноваційних, створених на основі передових наукових ідей, енергоефективних пристроїв для теплової обробки зерна. У зв'язку з цим необхідно розробляти та впроваджувати конструкції подібних пристроїв, що відрізняються відносно невеликою пропускнуою здатністю, які дозволяли б

фермерам отримувати необхідну якість зерна після теплового впливу при мінімальних енергетичних витратах [16, 17, 29].

Як зазначалося вище, контактний спосіб передачі теплоти має суттєвий недолік – високу нерівномірність нагріву оброблюваного продукту. Для усунення цього потрібно організувати постійний рух одиничного шару зерна по нагрівальній поверхні з його безперервним перемішуванням. При тепловій обробці одиничного шару зерна складно забезпечити високу пропускну здатність розроблених пристроїв. Однак при оптимальному поєднанні конструктивних і режимних параметрів у таких пристроях можна досягти пропускну здатності, що задовольняє потреби малих сільськогосподарських підприємств та фермерських господарств.

Висновки

1. Зерносушильне обладнання різноманітне за конструкцією, способом подачі теплоти, джерелом енергії та методом видалення вологи.

2. Найпоширеніші конвективні сушилки – барабанні, шахтні та камерні – прості в обслуговуванні, але характеризуються високою металомісткістю та енергоспоживанням.

3. Барабанні сушилки забезпечують інтенсивне перемішування зерна, але потребують окремого охолоджувача і витрачають 5–12 кДж/кг на випаровування вологи.

4. Шахтні рециркуляційні сушилки дозволяють сушити зерно різної вологості за один прохід, підвищуючи ефективність та знижуючи енергозатрати.

5. Камерні сушилки прості у виготовленні, але процес сушки нерівномірний, а витрати енергії перевищують 8 МДж/кг.

6. Контактні сушилки ефективні для одиничного шару зерна та характеризуються низькими енергозатратами (3,6–4,3 МДж/кг), проте обмежені в пропускну здатності.

7. Сушилки активного вентилярування малоефективні через низький ККД і нерівномірність сушки.

8. Для малих фермерських господарств потрібні компактні, енергоефективні установки з оптимальним поєднанням конструктивних і режимних параметрів, що забезпечують рівномірне сушіння зерна.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У КОНСТРУКЦІЇ КОНТАКТНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА

2.1 Конструктивно-технологічна схема установки контактної типу для теплової обробки зерна

Контактний спосіб передачі теплоти ефективно застосовують для підігріву зерна та часткового зниження його вологості перед переробкою, що підтверджено численними дослідженнями. Такий метод використовують на борошномельних і круп'яних підприємствах, де джерелом теплоти служать пар, гаряча вода, електроенергія або енергія, що виділяється при спалюванні газу та інших видів палива.

Під контактною поверхнею розуміють нагріту стінку сушильної камери, яка безпосередньо контактує зі шаром зерна. Інтенсивність нагріву залежить від температури цієї поверхні, товщини шару зерна та часу його перебування на гарячій поверхні.

Хоча контактний нагрів менш ефективний для високопродуктивних установок порівняно з конвективним способом подачі теплоти, він добре підходить для обробки невеликих партій зерна. При цьому можливо досягти високого рівня енергоефективності та якісної обробки зерна за рахунок оптимізації конструктивних і режимних параметрів сушильного обладнання.

Для нормального протікання процесів теплової обробки зерна (сушки, підсушування, підігріву тощо) необхідно дотримуватися певних вимог. У разі контактної способу передачі теплоти вони полягають у наступному:

- рівномірна подача тепла до оброблюваного зерна;
- забезпечення максимальної площі контакту зерна з нагрітою поверхнею теплообмінника;
- постійне відведення вологи, що виділяється з зерна (подача сухого і відведення вологого агента);

- переміщення і одночасне перемішування зернового шару для запобігання локальному перегріву зерен.

Біологічні властивості зерна визначають його максимальну допустиму температуру нагріву та максимально можливий одноразовий вологовідвід. Ці показники прямо впливають на параметри розроблюваного теплообмінника: температуру нагрітої поверхні, площу контакту з зерновим шаром, товщину шару та тривалість теплового впливу.

Параметри УТОЗ визначають джерело теплоти та його режимні характеристики (температуру, потужність тощо). Крім того, ефективність теплової обробки впливають умови навколишнього середовища: температура і вологість повітря, атмосферний тиск та інші фактори.

Таким чином, процес теплової обробки зерна в контактному електротеплообміннику визначається сукупністю факторів, кожен з яких прямо чи опосередковано впливає на ефективність роботи УТОЗ. Основними елементами конструкції УТОЗ є: циліндрична нагріта контактна поверхня з електронагрівачем, шнековий транспортуєчий робочий орган та пристрій для відведення вологи.

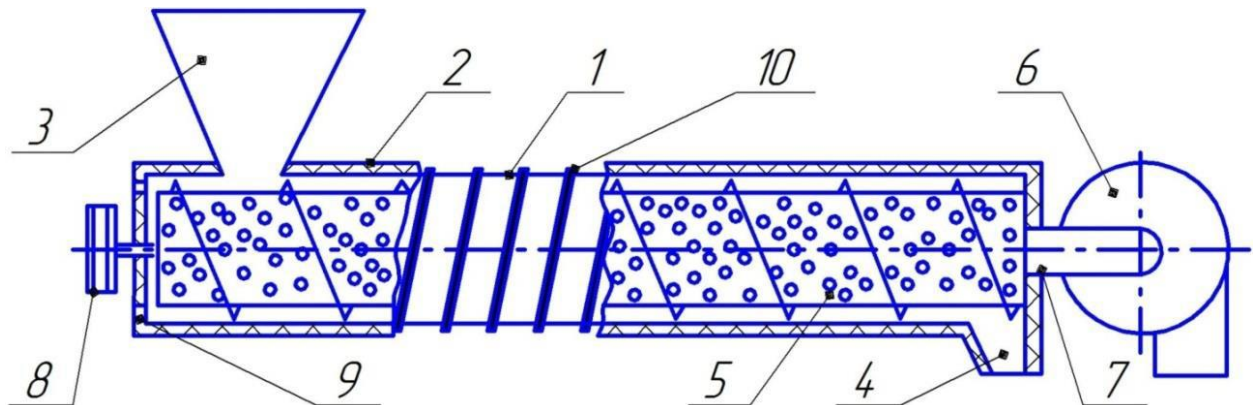


Рисунок 2.1 – Запропонована установка теплової обробки зерна (УТОЗ)
 1 - теплообменник; 2 – теплоизолирующий материал; 3 – загрузочный бункер; 4 – выгрузное окно; 5 – транспортирующий рабочий орган (перфорированный шнек); 6 – вентилятор; 7 – воздуховод; 8 – привод транспортирующего рабочего органа; 9 – отверстия; 10 – электрический нагревательный элемент

Контактна нагрівальна поверхня УТОЗ виконана у вигляді порожнистого циліндра, що забезпечує надійний контакт із зерном при простому конструктивному виконанні. Привід шнекового транспортуючого органа дозволяє плавно регулювати частоту обертання шнека, що забезпечує необхідну експозицію теплового впливу для різних зернових культур.

Система видалення вологи складається з вентилятора, повітроводів і електронагрівального елемента, встановленого на циліндричній поверхні. Нагрівач дозволяє підтримувати рівномірне температурне поле, а кількість видалюваного повітря регулюють зміною частоти обертання вентилятора або заслонкою у повітроводі.

Принцип роботи установки: після нагріву циліндра зерно подається в завантажувальний бункер, переміщується шнеком до розвантажувального вікна, контактує з нагрітою поверхнею і втрачає вологу. Волога відводиться повітряним потоком через перфорацію шнека і торцеві отвори циліндра.

Шнекова конструкція підвищує універсальність установки, дозволяючи обробляти зерно будь-яких культур з розміром, що не перевищує кільцевий зазор між шнеком і циліндром. Торцеві отвори поліпшують рух повітря через шар зерна, підвищуючи інтенсивність видалення вологи.

Установка може працювати автономно або як частина технологічної лінії, використовується для сушки, термічного обеззаражування та теплової обробки зерна різних культур із можливістю регулювання температури контактної поверхні і часу впливу. При інтеграції в лінію повітропровід може бути під'єднаний до загальної аспіраційної системи приміщення.

Розроблена установка універсальна, оскільки використання транспортуючого робочого органа дозволяє проводити теплову обробку зерна більшості сільськогосподарських культур із різними розмірно-масовими характеристиками. Переміщення зерна одиничним шаром за допомогою обертового органа забезпечує високу рівномірність теплової обробки при заданій якості готового продукту та необхідній пропускній здатності.

2.2 Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів транспортуючого робочого органу установки контактного типу

Однією з основних вимог для забезпечення енергоефективного та якісного протікання процесів теплової обробки зерна у представленій конструктивно-технологічній схемі УТОЗ є необхідність постійного перемішування зерна, що переміщується одиничним шаром. Реалізація цієї умови можлива при оснащенні його відповідними транспортуючими робочими органами. У зв'язку з цим обґрунтування параметрів транспортуючого робочого органу в УТОЗ є важливим аспектом при їхньому проектуванні. В запропонованій схемі реалізується гвинтовий (шнековий) транспортер.

$$\left. \begin{aligned} N_1 \cos \alpha - f_1 N_1 \sin \alpha - ma \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - f_2 N_2 \sin \beta &= 0 \\ f_2 N_2 \cos \beta - f_1 N_1 \cos \alpha - N_1 \sin \alpha - mr \frac{d^2 \varphi}{dt^2} &= 0 \\ G \cos \varepsilon - mr \omega_0^2 - mr \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - N_2 - 2mr \omega_0 \frac{d\varphi}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\},$$

N_H - нормальна реакція похилої площини, Н;

$\mu_{ш}$ - коефіцієнт тертя зернового матеріалу об лопать шнекової поверхні;

β - кут підйому гвинтової лінії, град.;

S - крок гвинтової поверхні шнека, м;

R_H - зовнішній радіус шнека (радіус гвинтової поверхні), м;

m - маса елемента зернового матеріалу, кг;

G - вага зернового матеріалу, Н;

N_K - нормальна реакція корпусу, Н;

μ_K - коефіцієнт тертя зернового матеріалу об стінку ТО;

α - кут між векторами переносної та абсолютної швидкостей, град.;

r - параметр гвинтового транспортуючого органу, м;

φ - кут, на який відхиляється частинка зернового матеріалу при обертанні шнека з постійною кутовою швидкістю, град.;

t - час, с;

ω - кутова швидкість відносного руху матеріальної точки, c^{-1} ;

θ - кут, що визначає положення точки відносно вертикальної площини;

$\psi(t)$ - кут повороту шнека за час t , град.;

Напрямок дії сил, прикладених до частинки зернового матеріалу в ТО із шнековим транспортуючим робочим органом, наведено на рисунку 2.2

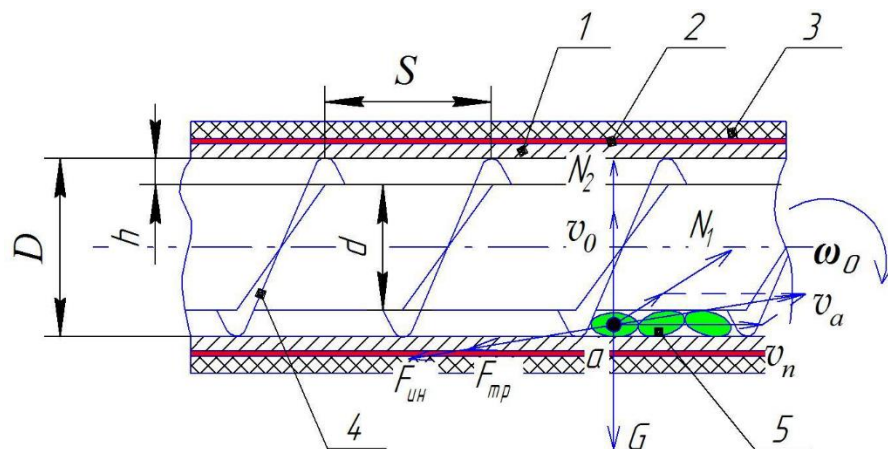


Рисунок 2.2 – Сили, що діють на частинку зернового матеріалу в УТОЗ із шнековим транспортуючим органом

1 – нагрівальна поверхня (кожух ТО); 2 – нагрівальний елемент; 3 – теплоізоляційний матеріал; 4 – шнековий транспортуючий робочий орган (шнек); 5 – зерно; S – крок шнекової поверхні, м; D – зовнішній діаметр шнекової поверхні, м; d – діаметр вала шнека, м; h – висота шнекової поверхні, м.

Положення розглядуваної частинки зернового матеріалу - точки «а» на поверхні гвинтової лінії транспортуючого робочого органу (шнека) при її рухові в безпосередньому контакті з нагрівальною поверхнею УТОЗ - характеризується зв'язком полярних координат із декартовими:

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi \\ y = r \sin \varphi \\ z = a \varphi \end{cases}$$

Вектор абсолютної швидкості розглядуваної одиничної частинки зерна визначається як:

$$v = v_{\Pi} + v_0$$

$$v = v_1 + v_2,$$

де:

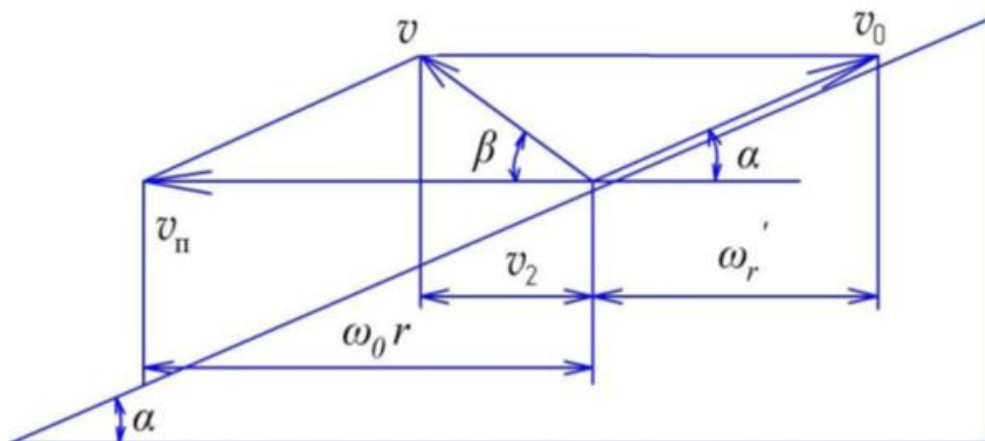
v_{Π} - переносна швидкість частинки зернового матеріалу;

v_0 - відносна швидкість (швидкість ковзання частинки по гвинтовій поверхні шнека);

v_1 - осьова складова абсолютної швидкості (швидкість ковзання по стінці нагрівальної поверхні УТОЗ);

v_2 - касальна складова швидкості, що характеризує окружну швидкість частинки у абсолютному обертальному русі;

ω - кутова швидкість абсолютного обертального руху частинки зерна.



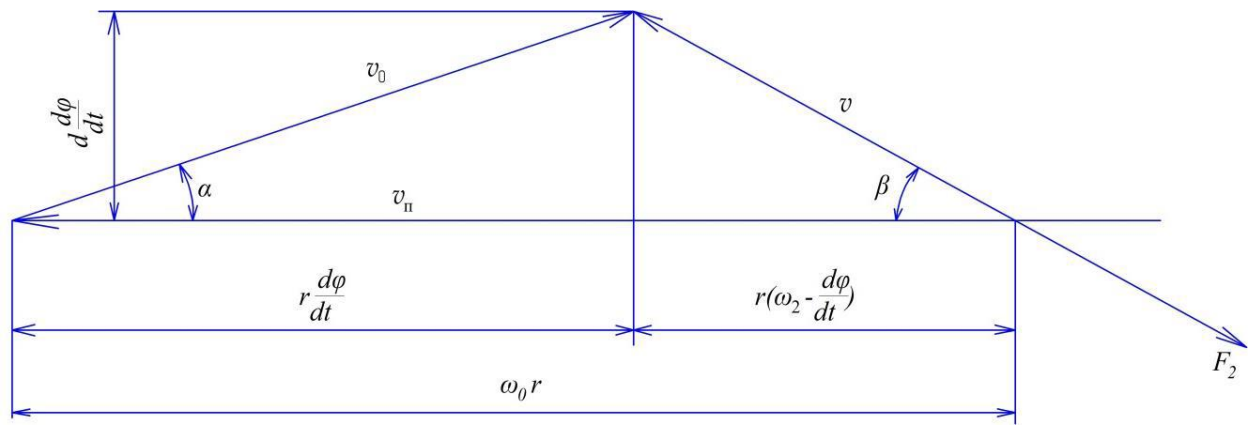


Рисунок 2.3 – Обґрунтування швидкості руху частинки зернового матеріалу в УТОЗ з гвинтовим транспортуючим робочим органом

При цьому:

$$v = \frac{\omega_0 r \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}; \quad (2.1)$$

$$v_1 = a \frac{d\varphi}{dt} = v \sin \beta = \frac{\omega_0 r \sin \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}; \quad (2.2)$$

$$v_2 = r \left(\omega_0 - \frac{d\varphi}{dt} \right) = v \cos \beta = \frac{\omega_0 r \sin \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)}; \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{v_2}{r} = \omega_0 - \frac{d\varphi}{dt} = \frac{v \cos \beta}{r} = \frac{\omega_0 \sin \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2.4)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \text{const}, \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} = 0, \quad m = 1, \quad G = mg = 1g = g.$$

Відповідно складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} N_1 \cos \alpha - f_1 N_1 \sin \alpha - f_2 N_2 \sin \beta = 0; \\ g \cdot \sin \varepsilon - f_1 N_1 \cos \alpha + f_2 N_2 \cos \beta - N_1 \cdot \sin \alpha = 0. \end{cases}$$

При цьому реакції сил, що діють на частинку зернового матеріалу, можна подати у такому вигляді:

$$N_1 = \frac{g \sin \varepsilon \sin \beta}{f_1 \sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta)};$$

$$N_2 = \frac{g \sin \gamma \sin \varepsilon \sin \beta (\cos \alpha - f_2 \sin \alpha)}{f_2 \sin \beta [f_1 \sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta)]}.$$

$$\frac{f_2 [\omega_0^2 r \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta + g \cos \varepsilon \sin^2(\alpha + \beta)] \cdot [\cos \beta - \sin \beta \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_2)]}{g \sin^2(\alpha + \beta) [-\sin \varepsilon]} = 1. \quad (2.5)$$

Таким чином, оброблюване зерно здійснює складний просторовий рух уздовж твірної поверхні транспортуючого робочого органа УТОЗ. Аналіз характеру цього руху, а також сил, що його зумовлюють, дає можливість визначити основні конструктивні параметри, необхідні під час проєктування установок контактного типу для теплової обробки зерна.

На осьову швидкість руху частинки зернового матеріалу у шнеку УТОЗ впливають такі конструктивні та експлуатаційні параметри:

- радіус шнека r ;
- кут нахилу гвинтової лінії β ;
- кутова швидкість обертання шнека ω ;
- коефіцієнти тертя зернового матеріалу: f_1 — при контакті з гвинтовою поверхнею шнека та f_2 — при контакті з нагрівальною (греючою) поверхнею;
- кут нахилу осі шнека (або кожуха установки) до горизонталі α .

У результаті впливу зазначених параметрів зміна середньої осрової швидкості частинки зернового матеріалу має синусоїдальний характер і може бути описана рівнянням:

$$v_{1cp} = a \left(\frac{180 - \gamma}{\gamma_1} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi(180 - \gamma)}{\gamma_1} \right), \quad (2.6)$$

γ_1 -чверть періоду функції в даному випадку становить 90° .

Способом найменших квадратів отримуємо рівняння:

$$v_{1cp} = v_{1cpmin} + 0,35 \left(\frac{180 - \gamma}{\gamma_1} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi(180 - \gamma)}{\gamma_1} \right), \quad (2.7)$$

v_{1cpmin} – мінімальне значення осьової швидкості частинки зернового матеріалу відповідає вертикальному розташуванню гвинтового транспортуючого пристрою сушильної установки (при $\gamma = 90^\circ$).

Отже, на осьову швидкість частинки зернового матеріалу в УТОЗ під час її переміщення гвинтовим транспортуючим робочим органом впливають різні фактори.

Під час проектування та експлуатації установок, оснащених гвинтовим транспортуючим робочим органом, зазвичай задають конструктивні та режимні параметри або визначають їх залежно від необхідної пропускної здатності та виду транспортованого матеріалу.

Слід зазначити, що особливий практичний інтерес представляє задача визначення кута нахилу гвинтової лінії транспортуючого робочого органу УТОЗ, при якому забезпечується максимальна гранична швидкість транспортування оброблюваного зернового матеріалу, а отже, і пропускна здатність установки.

Рівняння, що зв'язують абсолютну кутову швидкість частинки зернового матеріалу з кутом її повороту відносно осі гвинтового транспортуючого органу за певних умов.

$$d\varphi = (\omega_0 - \omega)dt; \quad (2.8)$$

$$v_1 = \frac{s}{2\pi}(\omega_0 - \omega), \quad (2.9)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{r \cos \varphi_1} \left\{ g \cos \alpha [\sin(\alpha + \varphi_1) - \cos(\alpha + \varphi_1) \sin \varphi] - f_2(\omega^2 r) \times \right. \\ \left. \times [\omega \cos \varphi_1 - \omega_0 \sin \alpha \sin(\alpha + \varphi_1)] \frac{1}{\sqrt{\omega^2 + (\omega_2 - \omega)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}} \right\}; \quad (2.10)$$

$$- \cos(\alpha + \varphi_1) \sin \varphi] - f_2(\omega^2 r + g \cos \delta \cos \varphi) [\omega \cos \varphi_1 - \\ - \omega_0 \sin \alpha \sin(\alpha + \varphi_1)] \frac{1}{\sqrt{\omega_0^2 + (\omega_0 - \omega)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}} \left. \right\}. \quad (2.11)$$

Слід зазначити, що під час руху частинки зернового матеріалу в кожусі УТОЗ за допомогою гвинтового транспортуючого робочого органу існують так звані критичні радіуси, при яких частинка набуває кутової швидкості шнека ω_0 , а її осьова швидкість прагне до нуля.

З рівняння (2.5), після перетворень, випливає:

$$\frac{f_2(\omega_0^2 r + g \cos \varepsilon)}{g[\sin \gamma \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) - \sin \varepsilon]} = 1. \quad (2.12)$$

Для горизонтального розташування осі гвинтового транспортуючого органу ТО ($\varphi = 0^\circ$) з формули (2.12) отримуємо:

$$r_{\text{кр}} = \frac{g(-\sin \varepsilon - f_2 \cos \varepsilon)}{f_2 \omega_0^2}. \quad (2.13)$$

Фізичний зміст цього виразу полягає в тому, що при горизонтальному розташуванні гвинтового транспортуючого робочого органу за будь-яких умов частка зернового матеріалу починає рух під кутом $\beta = 90 - (\alpha + \varphi_1)$.

З рівняння 3.13 отримаємо:

$$r_{\text{кр}} = - \frac{g[\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) + 1]}{\omega_0^2 \sqrt{1 + f_2^2 \operatorname{tg}^2(\alpha + \varphi_1)}} = f(\alpha, f_1, f_2, \omega_0). \quad (2.14)$$

Пропускнуну здатність гвинтового транспортера Q (т/год) можна визначити за формулою:

$$Q_{\text{пс}} = \frac{60\pi D^2}{4} \psi S n \gamma_0 c = 47D^2 \psi S n \gamma_0 c, \quad (2.15)$$

D – зовнішній діаметр шнека, м;

S – крок гвинтової поверхні шнека, м (для горизонтального розташування приймають повний крок);

n – частота обертання шнека, об/хв;

γ_0 – насипна густина оброблюваного зернового матеріалу, т/м³;

ψ – коефіцієнт заповнення кожуха ТО;

c – коефіцієнт, що враховує вплив кута нахилу осі шнека до горизонталі на пропускнуну здатність.

Для горизонтально розташованого шнека його діаметр D визначають за формулою:

$$D = 0,28 \sqrt{\frac{Q}{\psi n \gamma_0 c}}. \quad (2.16)$$

Максимальнуну частоту обертання шнека, с⁻¹ визначають за формулою:

$$n_{\text{max}} = \frac{A}{\sqrt{D}}, \quad (2.17)$$

A – коефіцієнт, що характеризує фізико-механічні властивості транспортованого матеріалу (для зерна зазвичай приймають $A \approx 1,05 \dots 1,1$)

Потужність, кВт, необхіднуну для приводу винтового транспортуєчого робочого органа, визначають за емпіричною залежністю:

$$N_{\text{привод}} = \frac{0,0027 Q_{\text{пс}} L W}{\eta} = \frac{0,1269 D^2 \psi S n \gamma_0 c L W}{\eta}, \quad (2.18)$$

L – довжина шнека, м;

W – емпіричний коефіцієнт опору руху зерна в кожусі шнека;

Це вираження показує, що на потужність, необхідну для приводу шнека, впливають майже всі конструктивні параметри транспортера. Рациональне їх взаємне підбору дозволяє зменшити сумарні енергетичні витрати на процес теплової обробки зерна в розроблюваних установках контактного типу.

2.3 Тепловий баланс засобів механізації теплової обробки зерна

Розглядається тепловий баланс установки, у якій вся тепла енергія використовується виключно на випаровування вологи з зерна. Процес теплової обробки (сушіння) у теоретичній сушильній установці відбувається при постійній температурі оброблюваного зерна. При цьому тепла енергія, що надходить у сушильну камеру, формується за рахунок двох джерел: тепла, переданого атмосферним повітрям, та тепла, отриманого в результаті контакту зерна з нагрітою поверхнею установки.

Теплота з атмосферного повітря, Дж/год:

$$q_o = L_{\text{пов}} i \quad (2.19)$$

$L_{\text{пов}}$ - кількість повітря, що подається в сушильну камеру, кг/год.

i – ентальпія повітря, Дж/кг

Тепловий баланс теоретичної сушилки:

$$q_o + q_{\text{не}} = L_{\text{пов}} i_1 = L_{\text{пов}} i_2$$

i_1, i_2 - ентальпія агента сушіння відповідно на вході та виході з сушильної камери, кДж/кг.

Кількість теплоти, що надходить у сушильну камеру, дорівнює кількості теплоти, яка відводиться разом з відпрацьованим агентом сушіння. Теплова енергія, яка витрачається на випаровування вологи з оброблюваного зерна, безпосередньо передається сушильному агенту разом із вологою у вигляді прихованої теплоти пароутворення.

У реальній установці для теплової обробки зерна не вся теплота витрачається на випаровування вологи – частина теплової енергії використовується на нагрівання самого зерна, його вологи, а також конструктивних елементів сушильної камери:

$$q_m = Gc_2(t_{31} - t_{32}) \quad (2.20)$$

G – пропускна здатність УТОЗ, кг/год; c_2 – теплоємність зерна на виході з УТОЗ, кДж/кгС; t_{31}, t_{32} – температура зерна до та після теплового впливу відповідно, °С.

Теплоємність зерна на виході з УТОЗ c_2 , Дж/кгС визначається з виразу:

$$c_2 = \frac{(100 - \omega_2)c_c + \omega_2 c_w}{100} \quad (2.21)$$

c_c, c_w – теплоємність сухої речовини зерна та води відповідно, Дж/кгС,
 ω_2 – вологість зерна після теплового впливу в УТОЗ, %

Втрати теплоти в навколишнє середовище, Дж/год, визначають за формулою:

$$q_{н.с} = 3,6 \sum S_c \alpha_m (t_{cp} - t_{зов.н}) \quad (2.22)$$

$\sum S_c$ - площа нагрівальної поверхні УТОЗ через яку витрачається тепло, м², $t_{cp} = (t_1 - t_2) / 2$ - середня температура повітря в зоні сушки, °С. $t_{зов.п}$ - температура зовнішнього повітря, °С, α_m - коефіцієнт теплообміну, Вт/м²°С

З урахуванням того, що реальна сушильна установка відрізняється від ідеальної, рівняння теплового балансу сушильної камери можна записати так:

$$L_{нов}i_o + q_{н.с} + c_g W t_o + q_d = L_{нов}i_2 + q_m + q \quad (2.23)$$

Ліва частина рівняння відображає загальну кількість теплоти в сушильній камері, що надходить із зовнішнім повітрям, від гріючої поверхні, із випаровуваної з зерна вологи та від додаткового підігрівача. Права частина характеризує сумарні витрати теплоти: із відпрацьованим агентом сушіння, з нагрітим зерном, що виходить із УТОЗ, та втрати в навколишнє середовище через теплопередачу через поверхню сушильної камери. З цього виходить, що витрата теплоти на теплову обробку зерна визначається:

$$q = q_{н.с} = L_{нов}(i_2 - i_o) - c_w W t_o - q_d + q_m + q_{нав.с} \quad (2.24)$$

Питома витрата теплоти, кДж/кг випареної вологи:

$$q_{пит} = \frac{q}{W} = L_{нов}(i_2 - i_o) - c_w t_o - q_d + q_m + q_{нав.с} \quad (2.25)$$

$q_d, q_m, q_{нав.с}$ - питома витрата теплоти від додаткового нагрівача, на нагрів зерна, на витрату в оточуюче середовище відповідно, Дж/кг

Таким чином, витрати теплової енергії на процес теплової обробки зерна залежать від таких факторів: початкових параметрів оброблюваного зерна та агента сушіння, способу підведення теплоти до зерна, а також втрат теплоти в навколишнє середовище. Для забезпечення мінімальних енерговитрат у процесі теплової обробки необхідно, щоб уся тепла енергія спрямовувалася

на нагрів зерна, випаровування з нього вологи та її ефективне видалення з зони теплового впливу.

Висновки

Зменшити енергоємність процесів теплової обробки при збереженні якості зерна можливо шляхом контактного нагрівання тонкого (одиночного) шару зерна у теплоізолюваному корпусі з постійним його перемішуванням та видаленням утворених водяних парів.

Отримані теоретичні закономірності відображають основні характеристики процесу контактного нагріву тонкого шару зерна. Вони можуть використовуватися для розрахунку температурного поля всередині оброблюваного зернового шару, а також для визначення інших показників тепло- та вологообміну.

Встановлено, що товщина зернового шару повинна трохи перевищувати максимальний розмір оброблюваного зерна, що дозволяє значно підвищити коефіцієнт теплообміну та, як наслідок, зменшити енергозатрати на процес. Фізична сутність механізму контактного способу передачі теплоти визначається взаємопов'язаними процесами переносу тепла, пари та рідини. Тепло- та вологоперенос, який відбувається в зерні під впливом теплового потоку, головним чином залежить від внутрішньої структури зернівки, фізико-хімічних властивостей її твердої фази та енергії зв'язку вологи, що міститься в зерні.

3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБРОБКА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Лабораторний стенд дослідження процесів теплової обробки зерна

На рисунку 3.1 показано лабораторний стенд УТОЗ. УТОЗ змонтована на рамі 1 і включає теплообмінник 13, який являє собою циліндричний корпус з електронагрівачем, шнековий перфорований транспортуєчий робочий орган (рис.3.2), а також пристрій для видалення випаровуваної вологи, що складається з вентилятора 7 та повітропроводу 11.

УТОЗ дозволяє досліджувати процеси теплової обробки зерна при різних температурах нагрітої поверхні, різній частоті обертання транспортуєчого робочого органу, різній експозиції теплового впливу, як без обдування, так і з обдуванням оброблюваного зерна повітрям (агентом сушіння) у широкому діапазоні швидкостей його руху.



Рисунок 3.1 – Лабораторний стенд УТОЗ

1- рама; 2 – кожух; 3 – бункер завантаження; 4 – лоток вивантаження; 5 – заслінка; 6 – шибер; 7 – вентилятор; 8 – випрямляч струму; 9- електродвигун; 10 – редуктор; 11 – повітропровід; 12 – комплект вимірювальних приладів; 13 – теплообмінник.

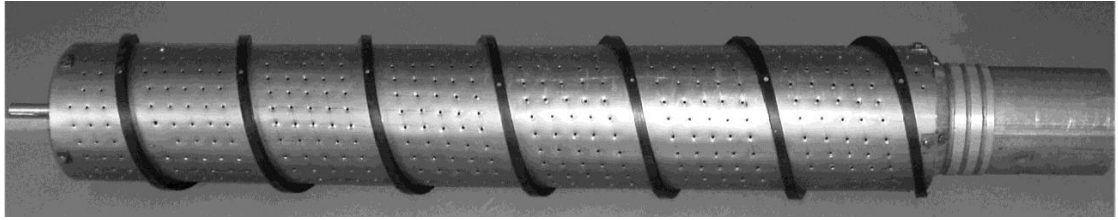


Рисунок 3.2 – Транспортуючий робочий орган установки УТОЗ

Контроль режимних параметрів теплової обробки зерна здійснюють за допомогою комплексу вимірювальних приладів 12 (рис. 3.1).

Гріюча поверхня УТОЗ розташована горизонтально та має форму порожнистого циліндра, що забезпечує ефективний контакт оброблюваного зерна з поверхнею при простій конструкції. Завдяки наявності електронагрівального елемента можна безступінчато регулювати температуру поверхні в інтервалі від 20 °С до 200 °С. Перед початком досліджень необхідно виміряти температуру гріючої поверхні та перевірити рівномірність температурного поля по її довжині за допомогою термопар.

Транспортуючий робочий орган приводиться в рух від електродвигуна постійного струму через редуктор, що забезпечує можливість плавного регулювання частоти обертання шнека, а відповідно – і швидкості переміщення зерна в установці.

Кількість відсмоктуваного повітря при видаленні парів вологи з теплової камери регулюють зміною положення заслонки в повітропроводі.

Експериментальна УТОЗ дозволяє проводити дослідження у широкому діапазоні основних режимних параметрів:

- частота обертання шнека – від 1 c^{-1} до 3 c^{-1} (змінюється напругою на двигуні від 80 В до 220 В);
- швидкість переміщення зерна – від 0,0027 м/с до 0,0076 м/с;
- споживана потужність нагрівального елемента – від 0,9 до 1,35 кВт залежно від необхідної температури гріючої поверхні;
- потужність електродвигуна приводу транспортуючого робочого органа – від 0,04 до 0,16 кВт.

Потужність електродвигуна вентилятора при досліджуваних режимах роботи практично не змінювалась і становила 0,26 кВт

3.1.1 Дослідження теплової обробки насіння соняшника

На рисунку 3.3 наведена технологічна лінія дробки насіння соняшника з використанням УТОЗ.



Рисунок 3.3 – Використання УТОЗ з насінням соняшника

У ході експериментальних досліджень застосовували раніше обґрунтовані оптимальні конструктивно-режимні та теплофізичні параметри УТОЗ. Проводили вимірювання вологості насіння до та після теплової обробки, контролювали температуру нагріву насіння після теплового впливу та температуру гріючої поверхні циліндра, після чого визначали сумарні витрати теплоти на 1 кг випарованої вологи.

При сушінні насіння соняшника температура гріючої поверхні становила 128...132 °С, відбір вологи за один прохід – 4...4,7 %, температура зерна на виході з УТОЗ – 34...36 °С. Сумарні питомі витрати теплоти на 1 кг випарованої вологи варіювалися від 3,42 до 3,68 МДж. Вказаний

температурний режим не призводив до істотного зниження схожості та енергії проростання насіння: при початковій вологості насіння 18 % та температурі гріючої поверхні 130 °С схожість після сушки знизилась на 4 %, енергія проростання – на 2 %. Це свідчить про достатню ефективність процесу сушки в запропонованій установці та відповідність просушеного насіння технологічним вимогам. Частина експериментальних даних за сушіння насіння соняшника на УТОЗ наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Показники роботи УТОЗ 1

Показник	Теорія	Експеримент	Відхилення, %
Пропускна здатність, т/год	0,16	0,155	-3,1
Споживана потужність, тах, кВт	1,55	1,6	3,2
Температура поверхні, °С	мін. 115 / макс. 145	110 / 150	-4,3 / 3,4
Швидкість руху насіння, м/с	0,0068	0,007	2,9
Експозиція сушки, с	184	178	-3,3

Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними не перевищує 4,3 %, що свідчить про їх високу збіжність.

Навіть при відносно невеликих габаритах і масі через установку за робочу зміну можна пропустити від 1,2 до 1,92 т насіння. При сушінні зерна або насіння для подальшого використання пропускну здатність можна збільшити вдвічі, відповідно підвищивши частоту обертання транспортуючого робочого органу, наприклад, за допомогою змінних шківів різних діаметрів.

Під час теплової обробки вологість насіння соняшника зменшувалась з 10...12 % до 5...7 %. При більшій початковій вологості насіння проводили дворазову теплову обробку: за перший прохід відбір вологи становив 4...4,7

%, за другий – 2,2...2,9 %. Температура насіння після сушіння складала 48...50 °С, після чого його направляли на переробку в олію.

3.1.2 Дослідження теплової обробки зерна пшениці

Під час досліджень УТОЗ у складі технологічної лінії з виробництва пшеничного борошна вологість зерна знижувалась з 16...21 % до 13...15 %. Температура зерна після сушіння становила 47...55 °С, що повністю відповідає технологічним вимогам. Гріюча поверхня працювала при температурі 130...150 °С, зняття вологи за один прохід – 2...6 %, а сумарні витрати теплоти на 1 кг випарованої вологи – 3,42...3,88 МДж. Режимы сушки регулювали за допомогою терморегулятора та зміни частоти обертання транспортуючого робочого органу. Результати наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Показники УТОЗ

Показник	Величина (теорія/експеримент)	Відхилення, %
Пропускна здатність, т/год	а) сушка зерна – 0,25 (теорія) / 0,239 (експеримент)	-4,4
	б) термічне знезаражування – 0,18 / 0,175	-2,8
Споживана потужність, тах, кВт	а) сушка зерна – 2,1 / 2,15	4,5
	б) термічне знезаражування – 7,35 / 7,6	3,4
Середня температура греючої поверхні, °С	а) сушка зерна – 50...70 / 50...70	–
	б) термічне знезаражування – 95...100 / 95...100	–
Експозиція теплової обробки, с	а) сушка зерна – 74 / 76	2,7
	б) термічне знезаражування – 123 / 125	1,6

Експериментальні дослідження УТОЗ підтвердили ефективність її роботи як при сушінні зерна, так і при його термічному знезаражуванні. Встановлено, що отримані експериментальні дані добре збігаються з теоретичними розрахунками: відхилення основних показників, таких як пропускна здатність,

споживана потужність та експозиція теплової обробки, не перевищує 4,5 %, що свідчить про правильність розроблених конструктивно-режимних параметрів установки. Пропускна здатність установки становить близько 0,24–0,25 т/год при сушінні зерна та 0,175–0,18 т/год при термічному знезараженні, що відповідає вимогам технологічного процесу. Температурний режим греючої поверхні (50–70 °С для сушіння та 95–100 °С для знезараження) забезпечує ефективну теплову обробку без критичного погіршення якості зерна. Регулювання експозиції теплової обробки та частоти обертання транспортуючого органа дозволяє оптимізувати процес під різні види зерна і забезпечити необхідні показники вологості та температури на виході з установки. Мала різниця між теоретичними і експериментальними результатами свідчить про високу точність математичної моделі та її придатність для прогнозування режимів роботи установки. Проведені дослідження підтверджують можливість використання УТОЗ як автономно, так і в складі технологічних ліній для комплексної підготовки зерна, включаючи сушіння та термічне знезараження, що забезпечує високу ефективність процесу та відповідність обробленого зерна технологічним вимогам.

3.2 Обґрунтування результатів дослідження

Слід зазначити, що в процесі пошукових дослідів було встановлено відсутність позитивного ефекту при сушінні насіння соняшника за частоти обертання шнека менше 1 c^{-1} і температури греючої поверхні понад 200 °С без видалення вологи з зони сушки. У такому випадку спостерігалось різке зростання сумарних питомих витрат теплоти на випаровування вологи, які в кінцевому підсумку перевищували 7 МДж/кг, а температура зерна на виході з УТОЗ перевищувала 45 °С, що призводило до критичного зниження схожості оброблюваного зерна.

За результатами обробки дослідів отримано рівняння регресії в натуральних значеннях факторів для часткового випадку, коли температура гріючої поверхні $t = 130$ °С, що відповідає початковому (нульовому) рівню варіювання зазначеного фактора:

$$q = 9,0667 - 2361,7v_3 + 2,0075v_3^2 + 203640v_B - 177,3v_B^2 - 0,13v_3v_B \quad (3.1)$$

q – питомі витрати теплоти на випаровування вологи, МДж/кг;

v_3 – швидкість руху насіння, м/с;

v_B – швидкість руху повітря, м/с.

Коефіцієнт кореляції, визначений за формулою:

$$R = \sqrt{\frac{\sum(y - \bar{y})^2 - \sum(y - \bar{y}_x)^2}{\sum(y - \bar{y})^2}}, \quad (3.2)$$

$\sum(y - \bar{y})^2$ – сума квадратів відхилень індивідуальних значень параметра оптимізації від загального середнього \bar{y} ; $\sum(y - \bar{y}_x)^2$ сума квадратів відхилень параметра оптимізації в конкретних точках плану від часткових середніх \bar{y}_x , що відповідають фіксованим значенням незалежних змінних, склало 0,942.

Табличне значення критерію Стюдента t_t при рівні значущості 0,05 та числі ступенів свободи $\nu_t = N - 1 = 60 - 1 = 59$, де N – кількість точок плану експерименту, дорівнює 2,004.

Табличне значення критерію Фішера F_t при 5%-ному рівні значущості для отриманого рівняння при степенях свободи чисельника $\nu_1 = k - 1 = 6 - 1 = 5$ та знаменника $\nu_2 = N - k = 60 - 6 = 54$, де k – кількість коефіцієнтів рівняння регресії, включно зі вільним членом, дорівнює 2,4. Розрахункове значення критерію

Фішера $F_p=2,22$. Оскільки $F_t=2,4 > F_p=2,22$, отримана математична модель є адекватною.

Табличне значення критерію Кохрена G_t при довірчій ймовірності $\gamma_d=0,95$ та числі ступенів свободи $\nu_q=m-1=2$ і $\nu_{zn}=N-1=59$, де m – кількість повторів досвіду в кожній точці плану експерименту, дорівнює $0,1131$. Розрахункове значення критерію $G_p=0,1063$. Нерівність $G_t=0,1131 > G_p=0,1063$ свідчить про відтворюваність результатів проведених вимірювань.

Графічне зображення поверхні відгуку, що відображає взаємодію швидкості руху насіння та швидкості руху повітря, наведено на рисунку.

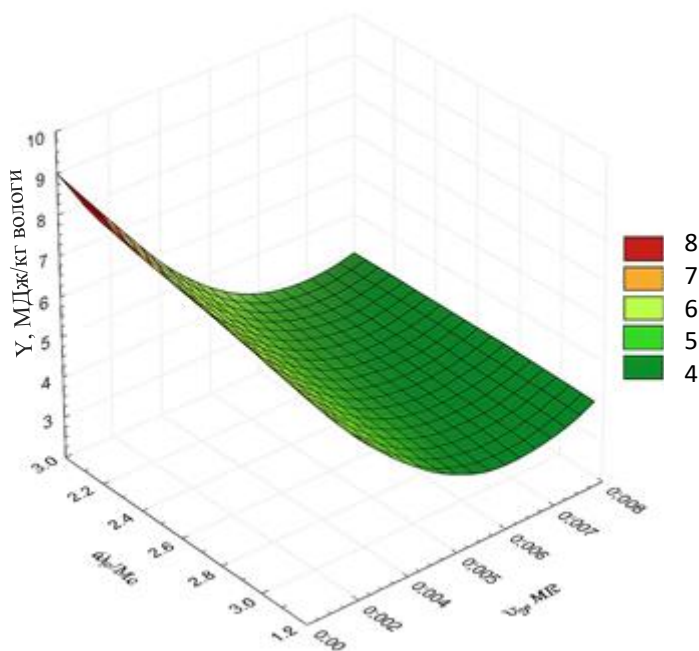


Рисунок 3.4 – Поверхня відгуку від швидкості руху насіння та повітря

Рисунок 3.4 демонструє, що поверхня відгуку залежності від взаємодії швидкостей руху насіння та повітря має вогнуту форму і мінімум у діапазоні експериментальних значень при $v_3 = 0,006-0,007$ м/с. У цьому випадку рівняння (3.1) у кодіваних значеннях факторів набуває наступного вигляду:

$$Y = 4,1273 - 1,6777x_2 + 0,2075x_3 + 1,2345x_2^2 - 0,0273x_3^2 - 0,2021x_2x_3, \quad (3.3)$$

де Y - сумарні питомі витрати теплоти на випаровування вологи, МДж/кг; x_2 - швидкість руху насіння; x_3 - швидкість руху повітря.

Коефіцієнти рівняння (3.3) свідчать, що в розглянутому випадку серед лінійних членів найбільший вплив на параметр оптимізації чинить швидкість руху насіння x_2 , а найменший — взаємодія швидкостей руху насіння та повітря (x_2 та x_3). При цьому збільшення x_2 призводить до зменшення параметра оптимізації. Серед нелінійних членів значний вплив має квадрат швидкості руху насіння, причому його збільшення веде до зростання параметра оптимізації.

За наведеним алгоритмом також були проаналізовані окремі випадки математичних моделей процесу сушіння зерна в УТОЗ, коли швидкість руху зерна $v_3 = 0,00515$ м/с, а швидкість руху повітря $v_b = 2,35$ м/с. Ці значення режимних параметрів відповідають нульовим рівням варіювання незалежних факторів.

Для випадку, коли швидкість руху зерна $v_3=0,0051$ м/с (нульовий рівень), рівняння регресії в натуральних значеннях факторів має вигляд:

$$q = -19,4851 + 0,3543t - 0,0173v_g - 0,0014t^2 + 0,0085tv_g - 0,1343v_g^2, \quad (3.4)$$

t — температура гріючої поверхні, °С.

Графічне зображення поверхні відгуку, що відображає взаємодію температури гріючої поверхні та швидкості руху повітря, а також їх вплив на критерій оптимізації, наведено на рисунку 3.5.

Рівняння (3.4) в кодованому значення:

$$Y = 4,9182 + 0,197x_1 + 0,208x_3 - 0,313x_1^2 - 0,027x_3^2 + 0,06x_1x_3, \quad (3.5)$$

x_1 — температура гріючої поверхні

Для випадку, коли швидкість руху повітря $v_b=2,35$ м/с (нульовий рівень), рівняння регресії в натуральних значеннях факторів має вигляд:

$$q = -16,4708 + 0,409t - 1916,02v_3 - 0,0014t^2 - 6,702tv_3 + 203640v_3^2. \quad (3.6)$$

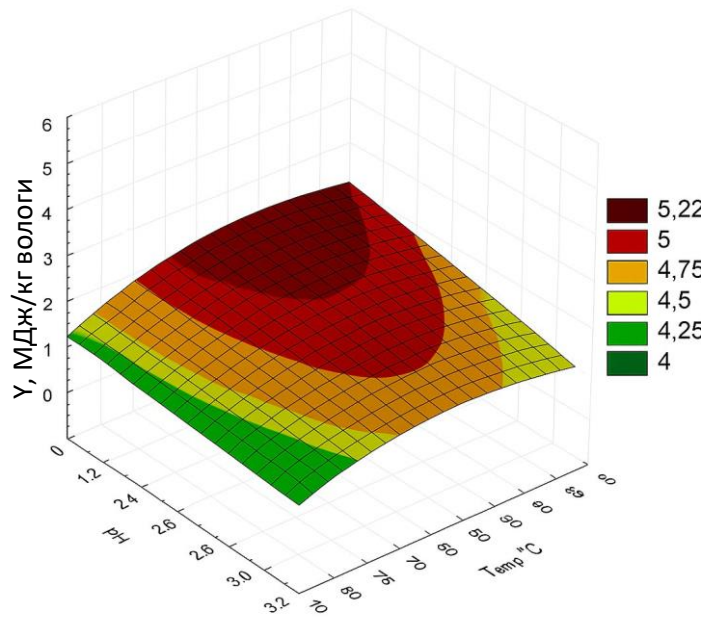


Рисунок 3.5 – Поверхня відгуку від температури гріючої поверхні та швидкості руху повітря

Графічне зображення поверхні відгуку від взаємодії температури гріючої поверхні та швидкості руху насіння, а також їх вплив на критерій оптимізації наведено на рисунку 3.6.

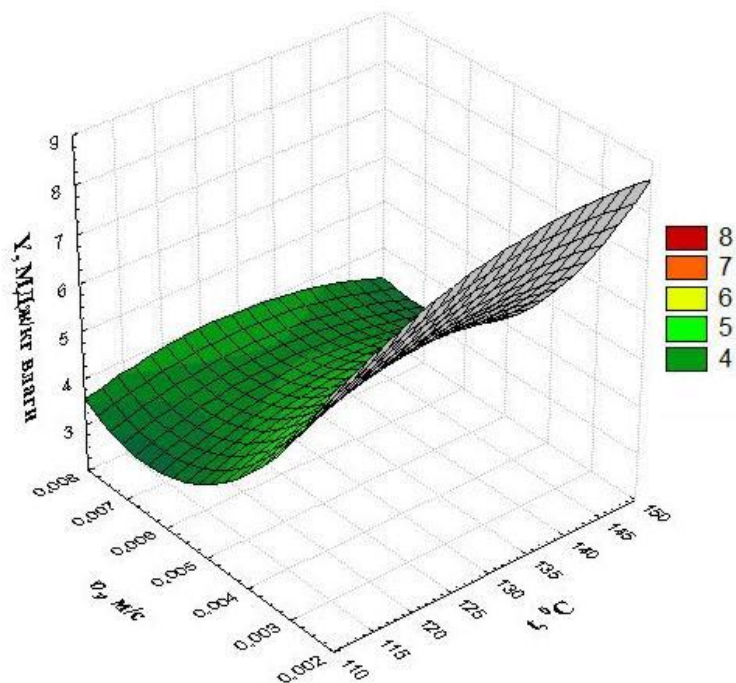
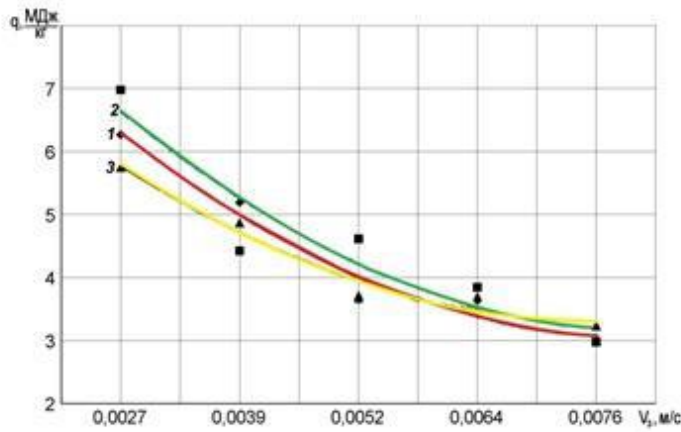


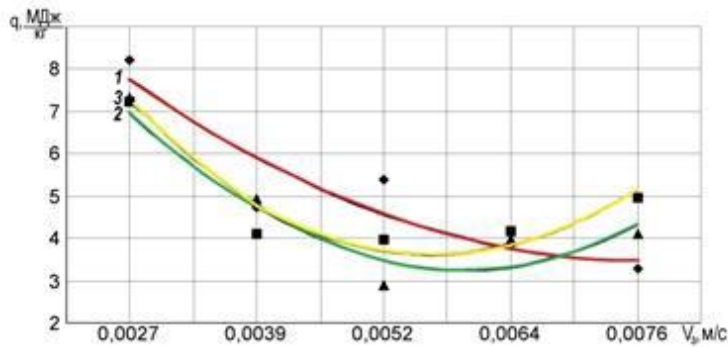
Рисунок 3.6 – Поверхня відгуку температури гріючої поверхні та швидкості руху насіння

Рівняння 3.6 в кодованому вигляді:

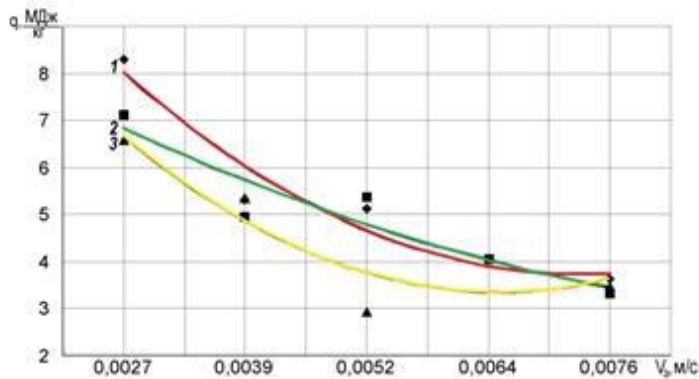
$$Y = 4,305 + 0,203x_1 - 1,7001x_2 - 0,313x_1^2 + 1,235x_2^2 - 0,247x_1x_2. \quad (3.7)$$



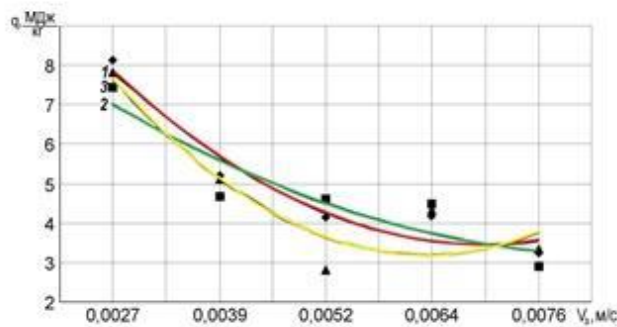
Температура гріючої
поверхні 115 °С



Температура гріючої
поверхні 125 °С



Температура
гріючої поверхні
135 °С



Температура гріючих
поверхні 145°С

Рисунок 3.7 - Залежності сумарного питомого витрати теплоти на випаровування вологи від швидкості руху зерна: крива 1 – при швидкості руху повітря $v_B=2,8$ м/с; крива 2 – $v_B=2,5$ м/с; крива 3 – $v_B=1,9$ м/с.

Аналіз кривих (рис. 3.7), що відповідають отриманим рівнянням, показує, що питомі витрати теплоти q на випаровування вологи з насіння соняшнику зі зростанням швидкості його руху в сушильній установці спочатку знижуються до певного мінімуму, після чого починають збільшуватися. При цьому більш інтенсивне зниження питомих витрат теплоти на випаровування спостерігається при великих швидкостях руху повітря, а при менших швидкостях інтенсивність цього зниження зменшується.

Аналіз експериментальних досліджень процесу сушіння насіння соняшнику в УТОЗ показав, що сумарні питомі витрати теплоти на випаровування вологи в серії з трьох дослідів становили 3,68; 3,51 та 3,2 МДж/кг. Середнє арифметичне значення дорівнювало 3,46 МДж/кг, що лише на 3,6 % відрізняється від оптимального значення, отриманого аналітичним шляхом, яке становить 3,59 МДж/кг. Це свідчить про високу точність та узгодженість результатів досліджень.

Внаслідок аналізу математичних моделей процесу сушіння насіння соняшнику визначені оптимальні значення незалежних факторів, при яких сумарні питомі витрати теплоти на випаровування вологи мінімальні і дорівнюють 3,59 МДж/кг: температура гріючої поверхні – 130 °С, швидкість руху повітря в сушильній установці – 2,83 м/с, швидкість руху насіння – 0,0068 м/с. Експозиція сушіння на зазначених режимах роботи УТОЗ становила 184 с, а разовий відбір вологи – у межах 2,5...3 %.

Пропускна здатність УТОЗ на вибраному режимі складає 0,15 т/год. Температура зерна на виході з сушильної камери за оптимальних режимів не перевищувала 39,5 °С, що не призводило до зниження його посівних якостей.

Слід зазначити, що під час лабораторних досліджень УТОЗ було встановлено: для досягнення більш рівномірного нагріву шару зерна, підвищення пропускної здатності та зниження питомих витрат енергії на випаровування вологи з поверхні зерна необхідно збільшити конструктивні параметри сушильної камери (діаметр і довжину кожуха). Крім того, доцільно

забезпечити ступінчастий нагрів кожуха по довжині, створюючи декілька незалежних зон нагріву.

Висновки

Проведені дослідження підтвердили ефективність роботи експериментальної установки теплової обробки зерна (УТОЗ) для сушіння насіння та зерна, а також для його термічного знезараження. Лабораторні та виробничі випробування показали, що УТОЗ дозволяє підтримувати оптимальні режимні параметри: температуру гріючої поверхні, швидкість руху насіння та повітря, а також експозицію теплового впливу, забезпечуючи необхідну продуктивність та високу якість обробленого зерна.

Аналіз коефіцієнтів рівняння регресії показав, що серед лінійних факторів найбільший вплив на параметр оптимізації чинить швидкість руху насіння, а найменший — взаємодія швидкостей руху насіння та повітря. Збільшення швидкості руху насіння призводить до зменшення параметра оптимізації, тоді як серед нелінійних факторів значний вплив має квадрат швидкості руху насіння, і його збільшення веде до зростання параметра оптимізації.

Графічний аналіз поверхонь відгуку показав, що питомі витрати теплоти на випаровування вологи спочатку знижуються зі зростанням швидкості руху насіння до певного мінімуму, а потім починають збільшуватися. Інтенсивність зниження витрат теплоти залежить від швидкості руху повітря: при великих швидкостях вона більш значна, при менших – зменшується.

Експериментальні дані підтвердили високу точність математичних моделей: середнє значення питомих витрат теплоти за серією дослідів (3,46 МДж/кг) відрізнялося лише на 3,6 % від аналітично отриманого оптимального значення (3,59 МДж/кг). Оптимальні параметри роботи УТОЗ для мінімізації витрат теплоти визначені як: температура гріючої поверхні – 130 °С, швидкість руху повітря – 2,83 м/с, швидкість руху насіння – 0,0068 м/с; експозиція сушіння становила 184 с, а разовий відбір вологи – 2,5...3 %. Пропускна здатність установки на оптимальному режимі – 0,15 т/год, температура зерна на виході – не більше 39,5 °С, що не погіршує його посівні якості.

Під час лабораторних досліджень було встановлено, що для більш рівномірного нагріву зернового шару, підвищення пропускної здатності та зниження питомих витрат енергії на випаровування вологи доцільно збільшити конструктивні параметри сушильної камери (діаметр і довжину кожуха) та забезпечити ступінчастий нагрів кожуха по довжині, створюючи декілька незалежних зон нагріву.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1. Загальні положення

Охорона праці є невід'ємною складовою частиною виробничого процесу і системи управління будь-якого агропромислового підприємства. Її головною метою є створення безпечних і здорових умов праці, запобігання травматизму, професійним захворюванням та аваріям, а також підвищення ефективності використання праці та виробничого обладнання.

Під час роботи установки теплової обробки зерна (УТОЗ) оператор та обслуговуючий персонал мають справу з підвищеною температурою, обертовими частинами механізмів, електричним струмом і пиловими викидами, тому важливим завданням є дотримання вимог охорони праці та техніки безпеки.

Загальні вимоги безпеки регламентуються такими нормативними документами:

- Закон України «Про охорону праці»;
- Кодекс цивільного захисту України;
- НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском»;
- НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»;
- ДСТУ ISO 45001:2019 «Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці»;
- Правила пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2014);
- Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99.

Усі працівники, допущені до обслуговування зерносушильних установок, повинні пройти вступний та первинний інструктаж з охорони праці, навчання безпечним методам роботи, а також перевірку знань з техніки безпеки. Особи, які не пройшли інструктаж, до роботи не допускаються.

4.2. Характеристика умов праці при експлуатації УТОЗ

У процесі сушіння зерна в установці теплової обробки (УТОЗ) мають місце такі потенційно небезпечні фактори:

- підвищена температура повітря у зоні нагріву;
- пилове забруднення повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму від роботи вентиляторів та електродвигунів;
- небезпечна напруга електричного струму;
- обертові частини механізмів (шнеки, транспортери);
- ризик займання зернового пилу при перегріванні.

Залежно від інтенсивності сушіння температура в сушильній камері може досягати 120–150 °С, тому корпус і поверхні нагріву потребують теплоізоляції, а обслуговування повинно проводитися лише після повного охолодження агрегату.

Підвищене пиловиділення характерне для робіт із зерновими культурами. Концентрація пилу у повітрі не повинна перевищувати 4 мг/м³ відповідно до ДСН 3.3.6.037-99. Для цього сушильне приміщення обладнується системою аспірації та вентиляції, яка забезпечує не менше трьох крат повітрообміну за годину.

4.3. Вимоги безпеки під час експлуатації установки

Перед початком роботи оператор УТОЗ зобов'язаний:

- перевірити технічний стан обладнання, електропроводки, наявність заземлення;
- переконатися у відсутності сторонніх предметів у сушильній камері, шнеках і вентиляторі;
- перевірити наявність вогнегасників і засобів індивідуального захисту;
- увімкнути установку лише після команди майстра або технолога.

Під час роботи слід:

– підтримувати встановлений режим сушіння, не допускаючи перевищення максимальної температури;

- контролювати температуру нагрівальних елементів і зерна на виході;
- забезпечувати рівномірну подачу зерна в камеру;
- періодично очищувати повітроводи від пилу;
- вести журнал роботи установки з фіксацією параметрів сушіння.

Категорично забороняється:

- проводити ремонт або чистку обладнання під час його роботи;
- торкатись електрообладнання мокрими руками;
- блокувати системи захисту, вентиляції або аварійного вимкнення;
- залишати установку без нагляду під час сушіння.

Після завершення роботи установка повинна бути відключена від електромережі, очищена від залишків зерна та пилу, а всі елементи переведені у безпечний стан.

Електрообладнання УТОЗ працює під напругою 380 В, тому до обслуговування допускаються лише особи з групою з електробезпеки не нижче II.

Усі електродвигуни, пускові пристрої, кабелі живлення повинні мати технічні паспорти, бути справними і відповідати вимогам НПАОП 40.1-1.21-98.

Основні заходи електробезпеки:

- обладнання повинно мати надійне заземлення;
- усі металеві частини корпусу установки з'єднуються із заземлювальним контуром;
- при підключенні та відключенні установки необхідно вимикати головний рубильник;
- у разі короткого замикання або іскріння установка негайно вимикається з мережі.

Електрощитова повинна бути розташована у сухому, добре вентилярованому приміщенні, мати попереджувальні плакати: «Напруга!», «Не вмикати — працюють люди!».

Процес сушіння зерна супроводжується нагрівом органічного матеріалу, що створює ризик займання при порушенні режиму. Основними причинами пожеж є перегрівання, скупчення пилу, коротке замикання та потрапляння сторонніх предметів у камеру.

Для запобігання виникненню пожежі необхідно:

- проводити регулярне очищення повітропроводів, вентиляторів і нагрівальних елементів від пилу;
- контролювати температуру нагрівальних поверхонь за допомогою термодатчиків;
- проводити щоквартальну перевірку стану електромереж;
- не допускати розміщення горючих матеріалів ближче ніж за 5 м від сушильної камери;
- забезпечити приміщення вогнегасниками ВВК-5 або ВП-9, пожежним щитом та ящиком з піском.

У разі займання установка негайно вимикається від електромережі, проводиться локалізація вогнища за допомогою вогнегасників, викликається пожежна команда.

Для забезпечення нормальних умов праці необхідно дотримуватись санітарних норм мікроклімату:

- температура повітря — 18–25 °С;
- відносна вологість — не більше 70%;
- швидкість руху повітря — до 0,3 м/с;
- освітленість робочої зони — не менше 200 лк.

Робоче місце оператора повинно бути обладнане місцевою витяжною вентиляцією, шумопоглинаючими екранами та достатнім рівнем природного і штучного освітлення. Шум від роботи вентиляторів не повинен перевищувати

80 дБ, при перевищенні цього рівня працівники повинні використовувати протишумні навушники.

Оператор установки повинен бути забезпечений засобами індивідуального захисту відповідно до Типових галузевих норм безплатної видачі спецодягу і спецвзуття:

Вид засобу	Призначення
Комбінезон бавовняний	Захист від пилу і підвищеної температури
Рукавиці термостійкі	Захист рук від гарячих поверхонь
Респіратор РПГ-67 або аналогічний	Захист органів дихання від пилу
Захисні окуляри	Захист очей від пилу та дрібних частинок
Беруші або навушники	Захист від шуму вентиляторів

Зберігання та догляд за засобами індивідуального захисту повинні здійснюватися у спеціально відведеному місці.

4.4 Охорона навколишнього середовища

У процесі роботи УТОЗ відбувається виділення пилу, водяної пари та теплого повітря. Для зменшення негативного впливу на довкілля необхідно:

- встановити пиловловлюючі фільтри на виході повітря;
- передбачити систему рециркуляції частини нагрітого повітря;
- періодично очищати робочі поверхні від залишків зерна;
- здійснювати прибирання пилу пилососом або механічним способом, не допускаючи його здування стисненим повітрям.

Утилізація відходів зерна та пилу повинна здійснюватися відповідно до вимог екологічного законодавства України.

Висновки

Дотримання вимог охорони праці при експлуатації установки теплової обробки зерна забезпечує безпечні та комфортні умови роботи, запобігає аваріям, травмам і пожежам. Регулярний технічний огляд обладнання, справність систем заземлення, вентиляції та захисту дозволяють знизити ризики до мінімуму. Розроблена УТОЗ є технологічно безпечною та може ефективно застосовуватись у зерносушильних комплексах сільськогосподарських підприємств за умови дотримання правил експлуатації та охорони праці.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕХАНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ

Вихідні дані:

Річна норма експлуатації: $H=2000$ год/рік.

Продуктивність УТОЗ: $P_1=0,15$ т/год.

Продуктивність базової сушарки: $P_2=0,25$ т/год.

Ціна електроенергії: 7,41 грн/кВт

Оплата праці: годинна ставка оператора $wh=100$ грн/год.

Кадри: УТОЗ $n_1=1$ оператор; Базова $n=2$ оператори.

Відрахування до фондів (соц. внески): $\alpha=0,22$ (22%).

Вартість обладнання:

УТОЗ: $C_1=200000$ грн.

Базова: $C_2=500000$ грн.

Норма амортизації: $\beta=0,15$ (15 %/рік).

Норматив на ремонт/ТО: $\gamma=0,05$ (5 %/рік).

Річний обсяг зерна (за продуктивністю УТОЗ):

$$M=P_1 \cdot H=0,15 \cdot 2000=300 \text{ т/рік.} \quad (5.1)$$

Початкова/кінцева вологість:

18 % \rightarrow 10 % \Rightarrow вилучення вологи $\Delta w=0,08$ т води/т зерна = 80 кг/т.

Кількість випарованої води на рік:

$$W=M \cdot 80=300 \cdot 80=24000 \text{ кг/рік.} \quad (5.2)$$

Сумарні питомі витрати теплоти:

УТОЗ: $q_1=3,59$ МДж/кг= $0,9972$ кВт/кг

Базова: $q_2=5,50$ МДж/кг= $1,5278$ кВт/кг

Кількість електроенергії на рік на випаровування:

$$\begin{aligned} E_1 &= W \cdot q_1 = 24000 \cdot 0,9972 \approx 23933 \text{ кВт} / \text{рік} \\ E_2 &= W \cdot q_2 = 24000 \cdot 1,5278 \approx 36667 \text{ кВт} / \text{рік} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Вартість електроенергії:

$$\begin{aligned} C_1 &\approx 23933 \cdot 7,41 \approx 177344 \text{ грн} / \text{рік.} \\ C_2 &\approx 36667 \cdot 7,41 \approx 271712 \text{ грн} / \text{рік.} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Економія електроенергії:

$$\Delta C = C_2 - C_1 \approx 94368 \text{ грн} / \text{рік.} \quad (5.5)$$

Годинні витрати на оплату праці з відрахуваннями для кожного персоналу:

Зарплата (брутто) оператора за рік:

$$S_{on} = w_h \cdot H \quad (5.6)$$

З урахуванням відрахувань:

$$S_{oper} = S_{on} \cdot (1 + \alpha). \quad (5.7)$$

Таким чином:

УТОЗ: $n_1=1$, $H=2000$

$$S_1 = 100 \cdot 2000 = 200000 \text{ грн} \cdot 1,22 = 244000 \text{ грн} / \text{рік} \quad (5.8)$$

Базова: $n_2=2$, робочих годин для базової сушарки, щоб обробити 300 т

$$S_2 = 2 \cdot 100 \cdot 1200 = 240000 \text{ грн} \cdot 1,22 = 292800 \text{ грн} / \text{рік} \quad (5.9)$$

Заощадження на оплаті праці:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = 292,800 - 244,000 = 48,800 \text{ грн} / \text{рік.} \quad (5.10)$$

Амортизаційні відрахування та ремонт:

УТОЗ:

$$\begin{aligned} A_1 &= 200,000 \cdot 0,15 = 30,000 \text{ грн/рік} \\ R_1 &= 200,000 \cdot 0,05 = 10,000 \text{ грн / рік.} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Базова:

$$\begin{aligned} A_2 &= 500,000 \cdot 0,15 = 75,000 \text{ грн / рік.} \\ R_2 &= 500,000 \cdot 0,05 = 25,000 \text{ грн / рік.} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Сумарні прямі витрати на рік для кожного варіанта (складаються з: електроенергія + оплата праці з відрахуваннями + амортизація + ремонт):

$$Z_1 = 177,344 + 244,000 + 30,000 + 10,000 = 461,344 \text{ грн / рік} \quad (5.13)$$

$$Z_2 = 271,712 + 292,800 + 75,000 + 25,000 = 664,512 \text{ грн / рік} \quad (5.14)$$

Річна економія (прямі витрати):

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = 664,512 - 461,344 = 203,168 \text{ грн / рік.} \quad (5.15)$$

Визначимо витрати на одиницю продукції та економію на 1 т:

$$z_i = \frac{Z_i}{M} \text{ (грн / т)}. \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{461,344}{300} \approx 1538 \text{ грн / т} \\ z_2 &= \frac{664,512}{300} = 2215 \text{ грн / т.} \end{aligned}$$

Економічний ефект на 1 т

$$\Delta z = z_2 - z_1 \approx 2215 - 1538 = 677 \text{ грн/т}$$

Період окупності T (років) для інвестиції в УТОЗ (якщо розглядати оплату власних витрат на покупку УТОЗ замість базової) розраховується як:

$$T = \frac{200,000}{203,168} \approx 0,985 \text{ року} \approx 11,8 \text{ місяців.} \quad (5.17)$$

Якщо розглядати чисту економію від заміни базової на УТОЗ (тобто економія у 203 тис. грн/рік при інвестиції 200 тис.), період окупності ≈ 1 рік.

Показник	УТОЗ	Базова	Різниця
Продуктивність, т/год	0,15	0,25	—
Річний обсяг, т	300	300	—
Випарана вода, кг/рік	24 000	24 000	—
Енергоспоживання, кВт·год/рік	23 933	36 667	-12 734
Вартість ел.енергії, грн/рік	177 344	271 712	-94 368
Витрати на оплату праці (з відрах.) грн/рік	244 000	292 800	-48 800
Амортизація, грн/рік	30 000	75 000	-45 000
Ремонт/ТО, грн/рік	10 000	25 000	-15 000
Разом, грн/рік (прямі витрати)	461 344	664 512	-203 168
Економія, грн/рік	—	—	203 168
Економія на 1 т, грн/т	—	—	≈ 677
Період окупності інвестиції (C1=200к грн)	—	—	$\approx 0,99$ року

Висновки

1. За прийнятими вихідними даними, перехід на більш енергоефективну установку УТОЗ, забезпечує зниження прямих річних витрат приблизно на 203 тис. грн при річному обсязі 300 т. Значна частина економії досягається за рахунок зменшення витрат електроенергії (~ 94 тис. грн/рік).
2. Пропонована УТОЗ має швидку окупність — близько 1 року при інвестиції 200 тис. грн і описаних параметрах.
3. Основні фактори чутливості: тариф на електроенергію, кількість персоналу, річний обсяг робіт і фактичні ціни обладнання. При зростанні тарифу на електроенергію економічна привабливість УТОЗ зростає.

ВИСНОВКИ

1. Зерноочисна установка (УТОЗ) має горизонтальний циліндричний гріючий елемент, перфорований шнековий транспортуючий орган і систему видалення пари вологи з вентиляцією. Конструкція дозволяє забезпечити ефективний контакт зерна з поверхнею нагріву, регульовану температуру (20–200 °С) та швидкість переміщення зерна, що робить установку придатною для дослідження різних режимів сушіння та термічного знезараження зерна.
2. Лабораторні випробування показали, що оптимальні режими сушіння насіння соняшника при температурі гріючої поверхні 130 °С і швидкості переміщення 0,0068 м/с забезпечують сумарні питомі витрати теплоти на випаровування вологи 3,59 МДж/кг, що дозволяє досягти необхідної вологості насіння без критичного зниження схожості та енергії проростання.
3. Під час сушіння зерна пшениці УТОЗ забезпечує зниження вологості з 16–21 % до 13–15 % та температуру зерна на виході 47–55 °С, що відповідає технологічним вимогам для подальшого помелу.
4. Створено та апробовано математичні моделі процесу сушіння зерна і насіння, що описують вплив швидкості руху зерна, швидкості повітря та температури гріючої поверхні на сумарні питомі витрати теплоти.
5. Отримані рівняння регресії дозволяють визначити оптимальні параметри режимів сушіння, які мінімізують енергозатрати. Моделі підтверджені експериментальними даними: середнє відхилення результатів не перевищує 3,6 %, що свідчить про їхню високу точність та придатність для прогнозування режимів роботи установки.
6. Розраховано прямі річні витрати для УТОЗ і базової зерносушарки: УТОЗ забезпечує економію приблизно 203 тис. грн на рік, що становить близько 677 грн на 1 т обробленого зерна. Період окупності капітальних вкладень складає приблизно 1 рік. Основна частина економії досягається

за рахунок зменшення витрат електроенергії та скорочення чисельності обслуговуючого персоналу.

7. Проведене дослідження доводить, що УТОЗ є ефективним засобом механізації процесів теплової обробки зерна та насіння. Впровадження УТОЗ у технологічні лінії післязбиральної обробки дозволяє підвищити енергоефективність, скоротити експлуатаційні витрати, зберегти якість зерна та насіння і забезпечити безпечні умови праці персоналу.

8. Використовувати ступінчастий нагрів гріючого циліндра та збільшені розміри сушильної камери для підвищення пропускної здатності і рівномірності нагріву.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковальчук, В. І. Технологія післязбиральної обробки зерна. Київ: Урожай, 2018.
2. Петренко, О. П. Якість зерна та насіння: теорія і практика. Харків: Фактор, 2020.
3. Іваненко, С. М. Сушка та зберігання зернових культур. Київ: Аграрна освіта, 2019.
4. Шевченко, Л. В. Фізико-хімічні властивості зерна і їх вплив на технологічні процеси. Львів: ЛНУ, 2017.
5. Кравченко, Ю. В. Оптимізація режимів сушіння зерна. Вінниця: Аграрний університет, 2021.
6. Демченко, М. І. Механізація сушіння зернових культур. Київ: НААН України, 2016.
7. Бойко, П. С. Рециркуляційні зерносушарки: технологія і експлуатація. Харків: Техніка, 2015.
8. Гончаренко, І. М. Теплотехнічні аспекти сушіння зерна. Київ: Урожай, 2020.
9. Федоренко, В. В. Технологія обробки зерна продовольчого та насінневого призначення. Львів: Аграрна наука, 2018.
10. Yu, P. Current Status of Grain Drying Technology and Equipment Development: A Review. *Applied Sciences*, 2025, 14(14), 2426. DOI: [10.3390/app14142426](https://doi.org/10.3390/app14142426)
11. Chang, K., Li, J., Jin, Y., & Liu, C. Development of Grain Dryer Control Technology from the Perspective of Low Carbon and Intelligentization. *Applied Sciences*, 2024, 14(22), 10587. DOI: [10.3390/app142210587](https://doi.org/10.3390/app142210587)
12. Siddique, A. B. Reducing Heat Stress Damage in Cereal Crops through Agronomic Management, Chemical Supplementation, and Breeding Approaches. *ScienceDirect*, 2025. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2025.157763](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.157763)

13. An, J. A Review of Applications of Energy Analysis: Grain, Fruit, and Vegetable Drying Technologies. ScienceDirect, 2024. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2024.113555](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.113555)
14. Martynenko, A. Sustainability of Drying Technologies: System Analysis. Royal Society of Chemistry, 2023. DOI: [10.1039/D3FB00080J](https://doi.org/10.1039/D3FB00080J)
15. Василєв, А. Н., & Северінов, О. В. Математична модель енергозберігаючої технології сушіння зерна. Технічні науки та технології, 2015, 3(1), 12–19. DOI: 10.15407/technika2015.01.012
16. Мухітдінов, Ж. П., & Сафаров, Е. Х. Огляд технологій та пристроїв для сушіння зерна та олійних культур. Хімічна технологія, контроль та управління, 2021, 3, 5–19. DOI: 10.15407/chemtech2021.03.005
17. Іванов О. В. Сушіння зерна та олійних культур: Теорія і практика. – Київ: Аграрна освіта, 2018. – 312 с.
18. Петров С. І. Механізація післяуборочної обробки зерна. – Харків: Техніка, 2017. – 256 с.
19. Ковальчук В. П., Сидоренко М. Г. Енергозберігаючі технології в агропромисловому комплексі. – Львів: Львівська політехніка, 2019. – 208 с.
20. Mujumdar A. S. Handbook of Industrial Drying. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 1008 p.
21. Fellows P. Food Processing Technology: Principles and Practice. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. – 648 p.
22. Heldman D. R., Hartel R. W. Principles of Food Processing. – New York: Springer, 2018. – 472 p.