

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО  
СЕРВІСУ ІМЕНІ ПРОФЕСОРА ОЛЕКСАНДРА СЕМКОВИЧА

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **“Обґрунтування параметрів сушарки  
сільськогосподарської продукції”**

Виконав: студент VI курсу групи Аін-61  
Спеціальності 208 „Агорінженерія”  
(шифр і назва)

Ярошко Ігор Миколайович  
(Прізвище та ініціали)

Керівник: Буртак В.В.  
(Прізвище та ініціали)

Рецензент: Гуменюк Р.В.  
(Прізвище та ініціали)

Дубляни 2024

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**  
**ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ**  
**ТЕХНОЛОГІЙ**  
**КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО**  
**СЕРВІСУ ІМЕНІ ПРОФЕСОРА ОЛЕКСАНДРА СЕМКОВИЧА**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

к.т.н., доцент Шарибура А.О.

“        ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

на дипломну роботу студенту  
**Ярошку Ігору Миколайовичу**

1. Тема роботи: **“Обґрунтування параметрів сушарки сільськогосподарської продукції”**

Керівник роботи: Буртак Володимир Володимирович, к.т.н., доцент  
Затверджена наказом по університету від 12.09.2024 року № 616/К-С

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 02.12.2024 року

3. Вихідні дані: методичні рекомендації до виконання дипломної роботи, довідкова література, каталоги, методика планування та проведення експериментальних досліджень, довідкова література, патентний пошук, інструкції з охорони праці.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Аналіз стану питання, мета та завдання досліджень.

2. Теоретичні дослідження робочих процесів.

3. Програма та методика досліджень.

4. Результати досліджень та їх аналіз.

5. Охорона праці та захист населення.

6. Економічна ефективність.

Висновки та пропозиції.

Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): графічна частина до дипломної роботи оформляється у вигляді презентації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3,4,6	Буртак В.В. к.т.н., доц. кафедри агроінженерії та технічного сервісу імені професора Олександра Семковича			
5	Кохана Т.М., к.е.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва			

7. Дата видачі завдання: 12.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор.	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Написання розділу: «<u>Аналіз стану питання, мета та завдання досліджень</u>»</i>	12.09.24-24.09.24	
2.	<i>Виконання другого розділу: «<u>Теоретичні дослідження робочих процесів</u>»</i>	25.09.24-08.10.24	
3.	<i>Виконання третього розділу: «<u>Програма та методика досліджень</u>»</i>	09.10.24-22.10.24	
4.	<i>Виконання четвертого розділу: «<u>Результати досліджень та їх аналіз</u>»</i>	23.10.24-06.11.24	
5.	<i>Написання розділу «<u>Охорона праці та захист населення</u>»</i>	07.11.24-18.11.24	
6.	<i>Виконання розділу: «<u>Економічна ефективність</u>»</i>	19.11.24-25.11.24	
7.	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому</i>	26.11.24-02.12.24	

Студент \_\_\_\_\_ Ігор Ярошко  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Володимир Буртак  
(підпис)

УДК 629.979:664.69

***Обґрунтування параметрів сушарки сільськогосподарської продукції.***

Ярошко Ігор Миколайович. Дипломна робота. Кафедра агроінженерії та технічного сервісу імені професора О. Семковича. –Дубляни, Львівський НУП, 2024.

69 с. текст. част., 23 рис., 5 табл., 27 джерел.

Розглянуто технологічні особливості, класифікацію та конструктивні елементи існуючих засобів для сушіння сільськогосподарської продукції.

На основі аналізу визначені мета та задачі дослідження.

Розглянуто основи технологічного і конструктивного розрахунку.

На основі комплексу експериментальних досліджень в результаті процесу вилучення вологи в рухомому шарі насіння визначено кінетику сушіння соняшника кукурудзи та сої під дією ІЧ та НВЧ випромінювання та встановлено, що вплив потужності випромінювачів та швидкості руху стрічки на швидкість і час сушіння мають нелінійний характер і ступінь цієї нелінійності неоднакова для різних культур, тому для кожної з культур потрібно визначати свої коефіцієнти критеріального рівняння для визначення максимальної швидкості сушіння. Експериментально доведено, що при швидкостях стрічки більших за 0,018 м/с температура продукту за час сушіння не досягає гранично допустимої на всьому діапазоні зміни питомої потужності випромінювачів. Для швидкості стрічки 0,007 м/с при питомій потужності НВЧ випромінювача 15 кВт/м<sup>2</sup> температура насіння соняшнику перевищила 65 °С.

Дослідний зразок сушарки дозволяє витратити 2,55 МДж/кг.вид.вол. при сушінні сої, 2,96 МДж/кг.вид.вол. при сушінні соняшника і 3,44 МДж/кг.вид.вол. при сушінні кукурудзи.

Термін окупності установки складає 2,61 року.

## ЗМІСТ

ВСТУП		
1	АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1	Аналіз актуальних проблем сушіння сільськогосподарської продукції	9
1.2	Аналіз науково-технічних протиріч щодо технологічних процесів сушіння	10
1.3	Аналіз машин та обладнання для сушіння	12
1.4	Мета та завдання роботи	18
2	ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ	19
2.1	Теоретичний аналіз процесу сушіння	19
2.2	Кінетика процесу сушіння сільськогосподарської продукції	20
2.3	Основи розрахунків сушарки сільськогосподарської продукції	24
3	ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	28
3.1	Експериментальні методи проведення дослідження	28
3.2	Методи визначення вологості сільськогосподарської продукції	30
3.3	Методика визначення параметрів процесів теплообміну	32
3.4	Методика по визначенню параметрів процесу масообміну	34
3.5	Аналіз досліджуваної установки стрічкової сушарки	36
4	РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ	38
4.1	Результати досліджень впливу питомої потужності на кінетику сушіння та температуру матеріалу	38
4.2	Результати досліджень енергетичних характеристик досліджуваної сушарки	42

4.3	Зведені результати досліджень стрічкової НВЧ+ГЧ сушарки	45
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ	47
5.1	Аналіз виробничих небезпек під час виробництва	47
5.2	Паспортизація санітарно-технічного стану та моделювання процесу виникнення травм та аварій	49
5.3	Розробка логічно-імітаційної моделі процесу виникнення травм під час виробництва	53
5.4	Розробка заходів щодо захисту населення	58
6	ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ	60
	ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	64
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67

## Вступ

Сучасні умови економіки у сфері виробництва сільськогосподарської продукції вимагають впровадження ресурсозберігаючих технологій, зокрема однією з ключових галузей агропромислового комплексу є зберігання та переробка насіння олійних культур.

Аналіз світових ринків демонструє, що такі культури, як соняшник, кукурудза та соя, є важливими не лише для внутрішнього споживання, але й мають високий попит за кордоном, що робить їх значною складовою українського експорту сільськогосподарської продукції.

Особливістю заготівельної системи в агропромисловості є необхідність швидкої переробки великих обсягів продукції для забезпечення її безпечного зберігання і транспортування. Найпоширенішим методом післязбиральної обробки є сушіння, яке відіграє ключову роль у збереженні якості зернової продукції. Водночас, цей процес є досить енерговитратним, що стимулює розвиток енергоефективних сушарок як в Україні, так і за її межами.

Окремою проблемою в Україні є ризик забруднення продукції продуктами згоряння при використанні суміші топкових газів з повітрям для зниження енергетичних витрат на сушіння. Це підкреслює важливість розробки сушильного обладнання, яке поєднує зменшення енергоємності з екологічною безпекою продукції.

Технології сушіння та відповідне обладнання постійно вдосконалюються. Останнім часом спостерігається тенденція до створення сушарок, що забезпечують передачу теплової енергії безпосередньо до продукту, зменшуючи теплові втрати. До таких рішень належать сушарки зі змішаним підведенням тепла та пристрої, які використовують різні види електромагнітного випромінювання.

Попередні дослідження вказують на перспективність технологій із комбінованим підведенням теплоти. Однак для їх впровадження необхідно дослідити кінетику процесу сушіння в таких умовах, що дозволить розробити

методики визначення оптимальних конструктивних та режимних параметрів нового обладнання.



# 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Аналіз актуальних проблем сушіння сільськогосподарської продукції

Основною метою сільськогосподарської промисловості є створення продукції з природною біологічною цінністю. Важливим напрямом у цьому процесі є впровадження до раціону нових напівфабрикатів рослинного походження. Такі продукти включають білки, ліпіди, вітаміни, мінеральні речовини й володіють високими поживними, смаковими та лікувально-профілактичними властивостями [5,6,11].

Збереження корисних компонентів у продуктах вимагає обмежень щодо температурної обробки, а залежно від складу сировини визначають оптимальні температурні режими:

- для сировини з ефірними оліями - сушіння при 30-45 °С, шаром 10-15 см, щоб уникнути втрат олій;
- сировина з глюкозидами потребує температури 50-60 °С для інактивації ферментів та збереження глюкозидів;
- алкалоїди зберігаються при температурі до 50 °С;
- для аскорбінової кислоти рекомендована швидка сушка при 80-90°С.

Сучасна світова проблема – ефективне використання енергоресурсів, впровадження енергозберігаючих технологій та застосування альтернативних джерел енергії [12]. Енергетика є ключовою галуззю, що споживає близько 25% енергоресурсів на електроенергію та 75% на інші потреби, як-от транспорт, теплопостачання та виробничі процеси. Серед лідерів енергоспоживання в харчовій промисловості – олійно-жирові підприємства. Зростання попиту на рослинні олії стимулює збільшення обсягів їх виробництва та посівів олійних культур [13].

Зерна сільськогосподарських культур є складними колоїдними структурами, які потребують ретельного контролю процесу сушіння. Волога, переміщуючись від центру зерна до поверхні, видаляється при нагріванні, а інтенсивність сушіння зростає із підвищенням температури [15].

Сільськогосподарські підприємства використовують різні типи сушарок: камерні, барабанні, шахтні, модульні тощо. Камерні сушарки підходять для сушіння кукурудзи та інших зернових, однак мають недоліки: висока вартість, великі розміри, низький рівень автоматизації. Барабанні сушарки є універсальними, проте їх не використовують для делікатних культур, як-от кукурудза чи бобові, через ризик пошкоджень [15]. Модульні сушарки, як-от «Сапфір», дозволяють ефективно сушити зерно за один прохід завдяки технології «cross-flow» [3].

Основні проблеми сушіння включають:

- скорочення часу сушіння;
- зниження температурного впливу;
- рівномірність розподілу енергії;
- підвищення енергетичної ефективності.

Технології сушіння зернових культур, що базуються на конвекційних методах, не повністю відповідають вимогам сучасності через значні енерговитрати, екологічні ризики та недостатню безпечність для продуктів [22].

## **1.2 Аналіз науково-технічних протиріч щодо технологічних процесів сушіння**

У технологічному циклі післязбиральної обробки зерна термообробка являється однією із основних операцій, зокрема, використання термічного сушіння забезпечує тривале зберігання сільськогосподарської продукції. Мікронізація сприяє покращенню поживних властивостей кормового зерна. Термічна дезінсекція та дезінфекція - знезаражують зерно перед зберіганням

чи сівбою, а термостимуляція насіння сприяє підвищенню схожості та енергії проростання [1-9, 25–27].

Сушіння зерна базується на підводі теплової енергії, яка сприяє переміщенню вологи з внутрішніх шарів матеріалу на його поверхню та її видаленню у вигляді пари в навколишнє середовище.

Класифікація методів теплової сушки залежить від способу підведення теплоти і включає:

- конвективне сушіння;
- кондуктивне сушіння;
- сушіння під впливом енергетичних полів;
- комбіновані методи.

Найпоширенішим у промисловості залишається конвективний метод, хоча він характеризується високими енерговитратами, зокрема для випаровування 1 кг вологи потрібно 4800–5200 кДж [10].

Енергетичні втрати при конвективному сушінні розподіляються так:

- через стінки сушарки та газопроводи – 5%;
  - у теплогенераторі через неповне згорання палива та тепловіддачу – 5%;
  - у теплообміннику теплогенератора – 20%;
  - на нагрів зерна (втрати теплоти з охолодженням зерном) – 7%;
  - на випаровування вологи – 38%;
  - на нагрівання повітря і парів води, які виходять із сушарки – 25%
- [18].

Через це коефіцієнт корисної дії (ККД) конвективних сушарок зазвичай не перевищує 45–55%. Такі показники обмежують можливості значного покращення ефективності сушіння при традиційних способах теплопередачі [17].

Інші методи термообробки зерна, що використовують конвективний енергопідвід, також демонструють низький ККД [19]. Це створює протиріччя: для інтенсифікації процесу сушіння потрібно збільшувати обсяг

теплоносія, що водночас збільшує втрати теплової енергії та екологічне навантаження [10-12]. Крім того, ефективність процесу обмежується максимально допустимою температурою продукту [13].

Таким чином, традиційні конвективні сушарки досягли меж своїх можливостей, і їх подальший розвиток є малоперспективним. Для покращення ефективності сушіння необхідно шукати нові способи підведення енергії, які забезпечать рівномірний розподіл теплоти в об'ємі матеріалу та зменшать енергетичні втрати.

### **1.3 Аналіз машин та обладнання для сушіння**

Сушіння є одним із ключових методів консервування продуктів, оскільки зниження вмісту вологи до певного рівня робить розвиток мікроорганізмів практично неможливим. Наприклад, для овочів цей рівень становить 12–14% вологи, а для плодів — 15–25%. Залежно від характеристик продуктів, що підлягають сушінню, використовуються різні способи, які забезпечують збереження харчової цінності, високі якісні показники та раціональне ведення процесу.

#### *Основні способи сушіння*

Сушіння може здійснюватися трьома основними способами (рис. 1.1):

1. З використанням підведеної енергії — передбачає зовнішнє джерело енергії для сушіння.
2. З використанням акумульованої енергії продукту — застосовується рідше.
3. З комбінованим використанням енергії — поєднує попередні методи.

У сільському господарстві найбільш поширеним є перший спосіб, який передбачає подачу теплової енергії до продукту з зовнішнього джерела.

#### *Конвективне сушіння*

Найпоширеніший метод сушіння з підведенням теплоти — конвективний спосіб, де теплота передається через сушильний агент

(зазвичай повітря або відпрацьовані гази), який продувається через шар продукту. Це підходить для кускових, дрібнозернистих та рідких продуктів. Продукт контактує безпосередньо із сушильним агентом, що забезпечує швидке випаровування вологи, але може супроводжуватися значними енергетичними витратами та ризиками нерівномірного сушіння [18-22].

#### *Кондуктивне сушіння*

Менш поширений кондуктивний спосіб передбачає передачу тепла через перегородку. Наприклад, у барабанних сушарках теплоносії (зазвичай пара) циркулює всередині труб або між стінками барабана. Цей метод підходить для дрібнозернистих і рідких продуктів, забезпечуючи більш рівномірне сушіння, але потребує складнішого обладнання.

#### *Радіаційне сушіння та інші методи*

Інші методи, як-от радіаційне сушіння, сушіння з використанням механічної енергії чи безпосередньої електроенергії, застосовуються рідше через складність реалізації, хоча вони мають великий потенціал для підвищення ефективності процесу [15, 23].

#### *Сучасні підходи до сушіння*

Попри широку популярність конвеєрних сушарок, їх недоліками є значні габарити та низька продуктивність. Сучасні технології пропонують інноваційні методи, такі як:

Сублімаційне сушіння — видалення вологи шляхом її заморожування та подальшого сублімаційного переходу у пароподібний стан;

Сушіння у віброкиплячому шарі, що забезпечує ефективну теплопередачу та рівномірність сушіння.

#### *Перспективи розвитку*

Ефективність сушіння значною мірою залежить від вибору методу, який дозволяє зберегти властивості продукту, оптимізувати витрати енергії та зменшити втрати. Подальший розвиток технологій спрямований на вдосконалення існуючих методів і впровадження нових, які забезпечать кращу якість та продуктивність процесу.



Рис.1.1 - Класифікація сушарок з використанням поданої до продукту енергії

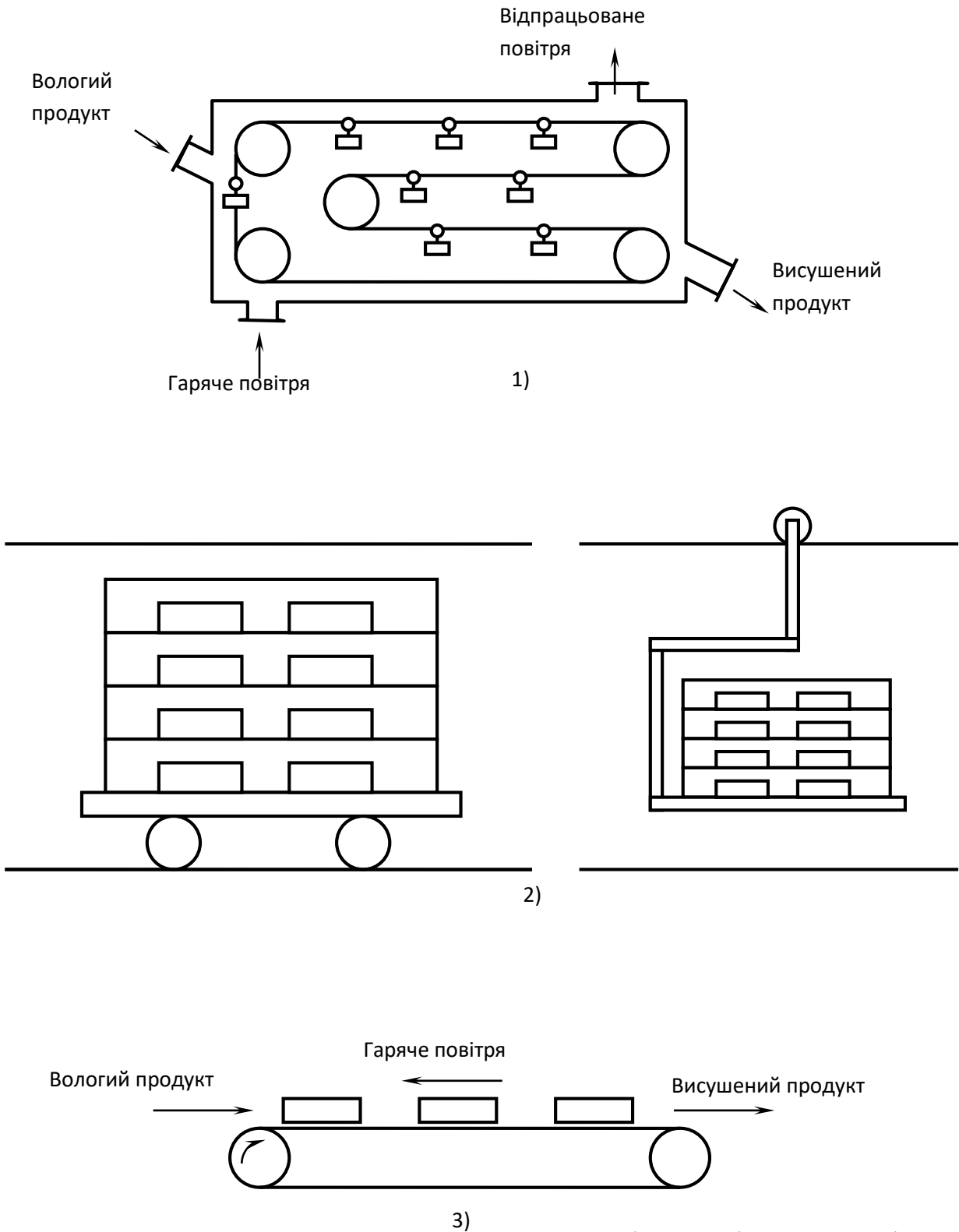


Рис.1.2 - Схеми тунельних сушарок для сушіння у щільному шарі:  
 1-конвеєрна; 2-візкова; 3-стрічкова.

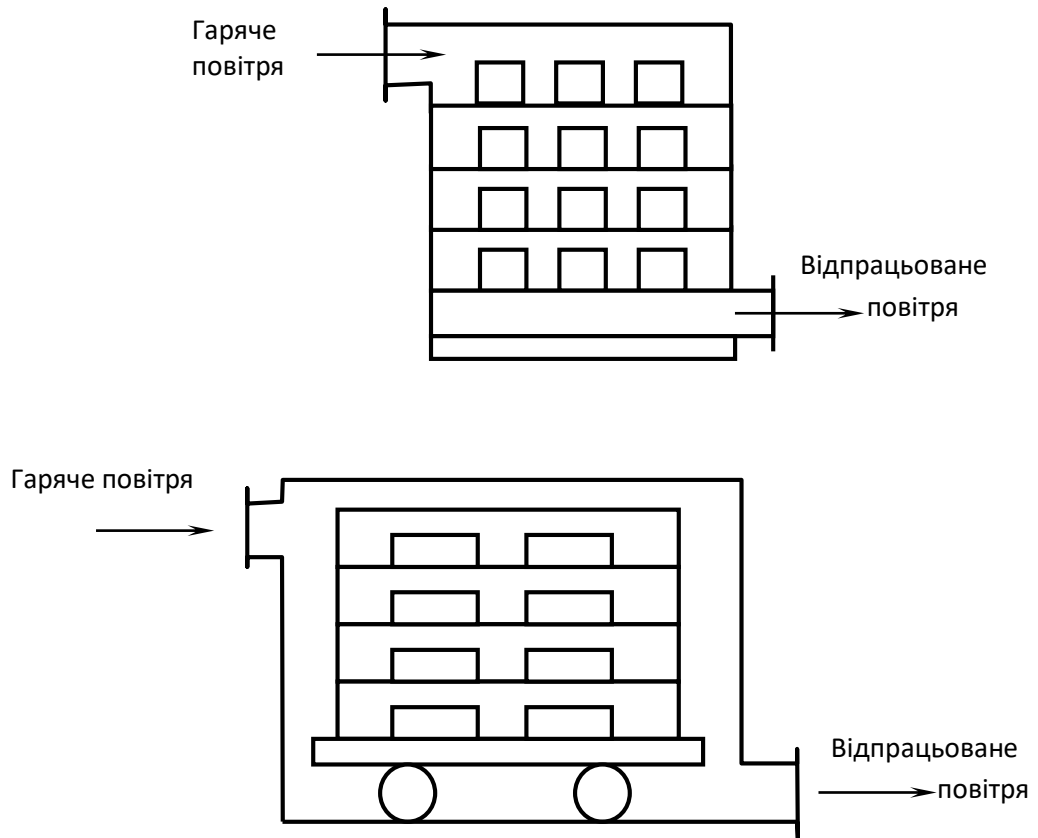


Рис.1.3 - Схеми камерних сушарок для сушіння у щільному шарі:  
1-шафова; 2- візкова.

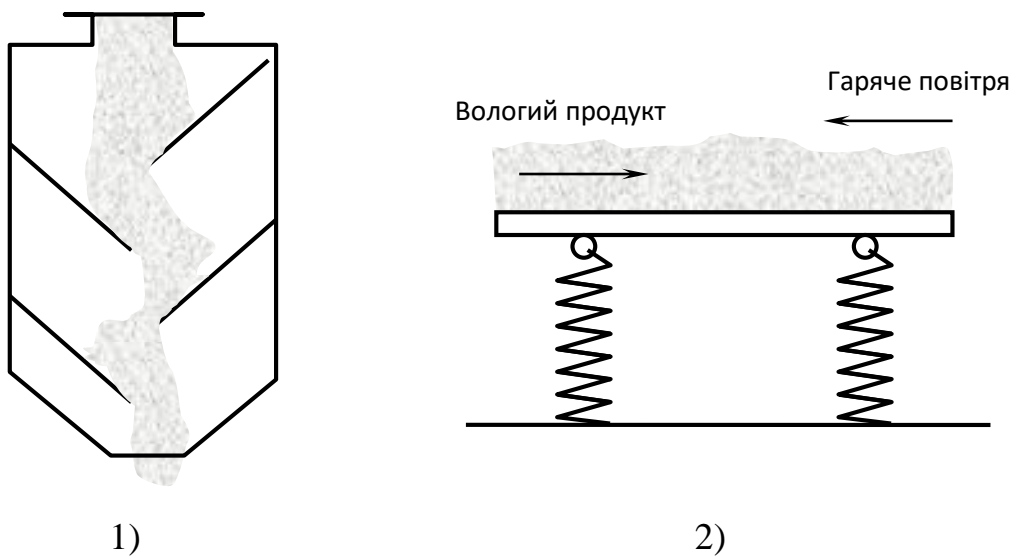


Рис.1.4 - Схеми сушарок для сушіння у розрихленому шарі:



1-каскадна; 2-вібраційна.

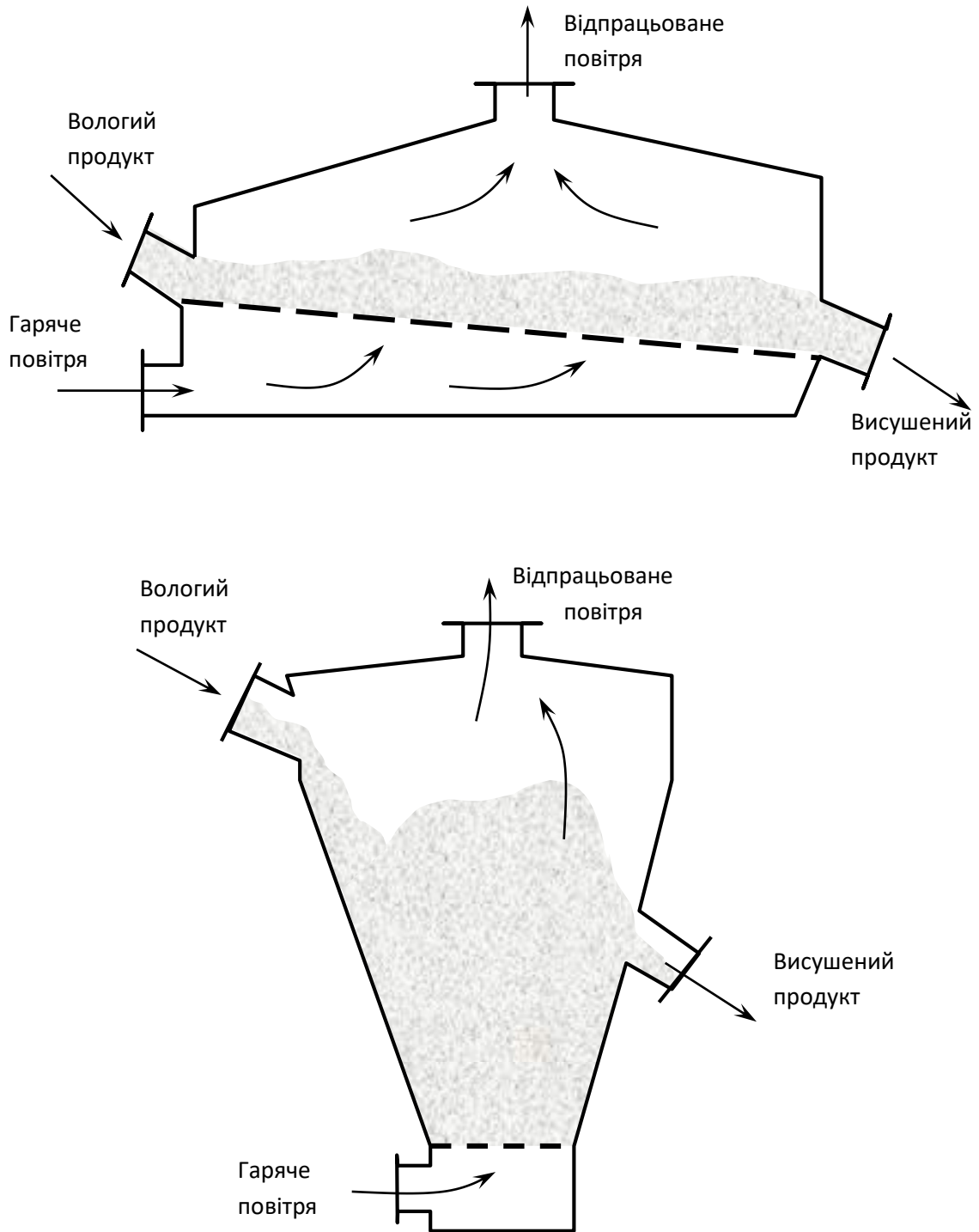


Рис.1.5 - Схеми сушарок для сушіння у рухомому шарі:

1-з киплячим шаром; 2-з фонтануючим шаром.

#### 1.4 Мета та завдання роботи

Метою роботи є дослідження кінетики процесу сушіння сільськогосподарської продукції у стрічковій сушарці із комбінованим мікрохвильовим та інфрачервоним підведенням енергії та визначення параметрів функціонування сушарок такого типу, що забезпечують раціональні режими сушіння.

Для здійснення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

- здійснити аналіз сільськогосподарської продукції, способів та методів сушіння;
- проаналізувати машини та обладнання для здійснення процесу сушіння;
- провести аналіз теоретичні дослідження робочих процесів сушіння;
- розробити методики проведення дослідження процесів сушіння сільськогосподарської продукції в стрічковій сушарці з інфрачервоним та мікрохвильовим підведенням енергії;
- провести експериментальні дослідження та їх аналіз, щодо процесів сушіння сільськогосподарської продукції в стрічковій сушарці з інфрачервоним та мікрохвильовим підведенням енергії;
- здійснити аналіз стану охорони праці та виробничих небезпек;
- обґрунтувати техніко-економічні показники.

Об'єкт дослідження – стрічкова сушарка із комбінованим мікрохвильовим та інфрачервоним підведенням енергії.

Предмет дослідження – параметри процесу сушіння сільськогосподарської продукції стрічковою сушаркою із комбінованим мікрохвильовим та інфрачервоним підведенням енергії

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ

### 2.1 Теоретичний аналіз процесу сушіння

Види зв'язку вологи з матеріалом є важливим аспектом вивчення сушіння, оскільки характер зв'язку впливає на вибір способу її видалення. Залежно від природи взаємодії вологи з матеріалом розрізняють такі основні види:

#### 1. Хімічний зв'язок

Типи зв'язку: іонний, молекулярний.

*Особливості:*

- Найбільш міцний зв'язок між вологою і матеріалом.
- Вода входить до складу хімічних сполук матеріалу.

Для видалення такої вологи потрібні інтенсивні термічні або хімічні методи.

#### 2. Фізико-хімічний зв'язок

Форми:

Адсорбційний зв'язок:

Волога утримується поблизу поверхні розділу колоїдних частинок і навколишнього середовища.

Зв'язок забезпечується молекулярним силовим полем.

Вода такого типу називається зв'язаною, оскільки вона міцно утримується в матеріалі.

Адсорбція супроводжується виділенням тепла.

Осмотичний і структурний зв'язок:

- Волога утримується в матеріалі слабше, ніж адсорбційна.
- Процес зв'язування не супроводжується виділенням тепла. Це менш міцно зв'язана волога.

#### 3. Механічний зв'язок

Форми:

- Капілярна волога: знаходиться в капілярах матеріалу.

- Макрокапілярна волога: утримується на поверхні тіла.

Особливості:

Волога такого типу є найменш зв'язаною з матеріалом. Її легко видалити механічними методами (віджиманням, пресуванням). Вона називається вільною вологою. Волога в матеріалі розподіляється нерівномірно. Для її характеристики використовуються два показники як середня концентрація вологи в матеріалі, концентрація в даній точці матеріалу, рівноважна вологість [7,11, 24].

Вологість матеріалу, при якій припиняється обмін вологи між матеріалом і навколишнім середовищем, називається рівноважною вологістю.

Вона залежить від парціального тиску водяної пари та температури навколишнього середовища.

Важливий параметр для прогнозування умов зберігання та вибору режимів сушіння.

Розуміння природи зв'язку вологи з матеріалом дозволяє ефективно проектувати процеси сушіння та обирати оптимальні технологічні рішення для збереження властивостей продукту.

Вологістю матеріалу називають вміст вологи у відсотках маси вологи матеріалу:

$$W = \frac{m_{в.л}}{m} \cdot 100\% , \quad (2.1)$$

де  $m_{в.л}$  - маса води, кг;  $m$  - загальна маса матеріалу, кг.

## 2.2 Кінетика процесу сушіння сільськогосподарської продукції

Процес конвективного сушіння характеризується переміщенням вологи всередині матеріалу та її випаровуванням з поверхні під впливом сушильного агента (зазвичай гарячого повітря чи газів). Основні особливості цього процесу можна описати основним рівнянням волого провідності згідно рівняння Фур'є:

$$m_w = -K_w F \frac{dC}{dx} \tau, \quad (2.2)$$

де  $m_w$  - кількість вологи, яка пройшла через поверхню  $F$  за час  $t$  при градієнті концентрації;  $K_w$  - коефіцієнт, який залежить від характеру зв'язку вологи з матеріалом і від властивостей матеріалу.

Переміщення вологи в матеріалі згідно напрямку руху вологи, волога мігрує від центру шматків матеріалу до поверхні, яка контактує із сушильним агентом. Такий рух обумовлений різницею концентрацій вологи в різних ділянках матеріалу (концентраційний градієнт).

Форми міграції вологи - у вигляді рідини, зокрема: осмотична волога переміщується через клітинні стінки рідкою фазою. Такий механізм характерний для матеріалів із високим вмістом вологи [5, 25,26].

У вигляді пари - при зниженні вологості матеріалу зростає частка парової фази в міграції. Волога випаровується з внутрішніх шарів, переміщуючись у вигляді пари до поверхні.

Вплив температурного градієнта:

Температурний градієнт, спричинений нагріванням зовнішньої поверхні, викликає явище термовологопровідності. Волога рухається в напрямку потоку тепла, що підвищує інтенсивність процесу сушіння.

Загальні показники кількості вологи, що переміщається під дією температурного градієнта  $\frac{dt}{dx}$  виражають рівнянням:

$$m_t = -K_t F \frac{dt}{dx} \tau. \quad (2.3)$$

Сумарні показники кількості вологи, яка переміщається при наявності обох градієнтів, при конвективному сушінні.

$$m = m_w - m_t. \quad (2.4)$$

Процес сушіння характеризується швидкістю видалення вологи, яка залежить від форми зв'язку вологи з матеріалом (хімічний, фізико-хімічний, механічний), механізму переміщення вологи (рідка чи парова фаза).

Швидкість сушіння при початковому етапі, переважає інтенсивне видалення вільної (механічно зв'язаної) вологи, а у подальшому, коли залишаються міцно зв'язані форми вологи, швидкість процесу зменшується.

Крива сушіння графічно відображає залежність середньої вологості матеріалу від часу. Побудову кривої сушіння виконують за експериментальними даними, отриманими в процесі сушіння матеріалу.

На кривій виділяють характерні ділянки:

- Зона постійної швидкості сушіння: видалення вільної вологи.
- Зона падаючої швидкості сушіння: видалення зв'язаної вологи.

*Фактори, що впливають на процес сушіння:*

1. Фізичні властивості матеріалу - пористість, капілярна структура, розмір частинок.
2. Характеристика зв'язку вологи - чим міцніше зв'язок, тим більше енергії потрібно для видалення вологи.

До параметрів сушильного агента відносять - температурц, швидкість руху, вологовміст.

Температурний градієнт - збільшує інтенсивність тепломасопереносу.

Ефективність конвективного сушіння залежить від взаємодії всіх цих факторів, що впливають на швидкість і якість процесу.

В загальному вигляді крива сушіння складається з декількох ділянок.

Процес конвективного сушіння матеріалу умовно розділяється на два основні періоди: період постійної швидкості сушіння (I період) та період падаючої швидкості сушіння (II період). Опис цих етапів базується на зміні вологості матеріалу в часі та її зв'язку з тепломасообмінними процесами.

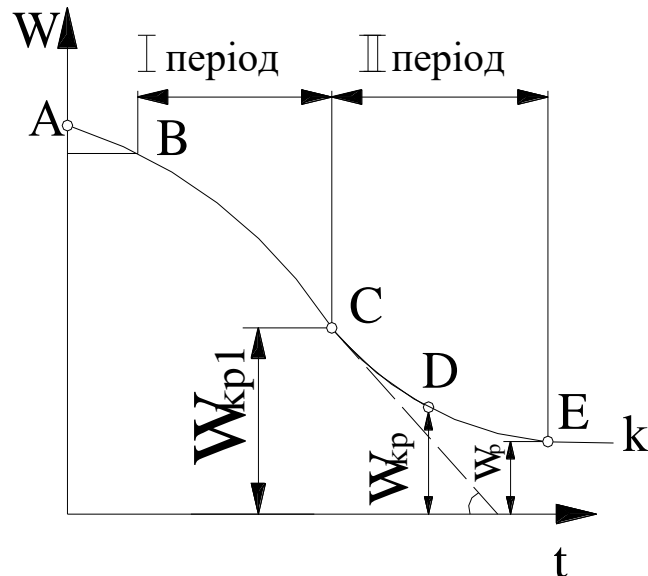


Рис.2.1 - Крива сушіння матеріалу.

### Періоди сушіння:

1. Період постійної швидкості сушіння (I період). Тривалість: починається після короткого періоду прогріву (діл. AB), під час якого температура матеріалу та поверхні досягає значень, необхідних для початку активного випаровування вологи. Вологість матеріалу інтенсивно знижується відповідно до прямолінійного закону (BC). В цей час випаровується вільна (механічно зв'язана) волога, яка знаходиться на поверхні або у капілярах матеріалу. Швидкість випаровування залежить виключно від параметрів сушильного агента (температури, вологовмісту, швидкості руху).

Вода випаровується з поверхні матеріалу, підтримуючи її у зволоженому стані завдяки капілярному підсосу вологи з глибини.

2. Період падаючої швидкості сушіння (II період). Починається після досягнення першої критичної вологості (точка C). При цьому вологість матеріалу знижується повільніше (ділянка CE), а крива наближається до асимптоти, що відповідає рівноважній вологості.

У цьому періоді починається видалення зв'язаної вологи (адсорбційно зв'язаної, осмотичної, структурної).

Рушійна сила процесу – градієнт парціального тиску водяної пари. Тиск водяної пари на поверхні матеріалу стає меншим, ніж тиск чистої води при такій же температурі.

Швидкість сушіння залежить не лише від умов навколишнього середовища, а й від вологопровідності матеріалу (здатності проводити вологу з глибини до поверхні), температурного градієнта.

Кінцевий етап (Е) - вологість наближається до рівноважної, коли швидкість випаровування з матеріалу дорівнює швидкості конденсації з повітря. Подальше видалення вологи стає неможливим за існуючих умов.

Висновки:

- I період (постійна швидкість): процес визначається параметрами сушильного агента, а волога видаляється інтенсивно з поверхні.

- II період (падаюча швидкість): ключову роль відіграє вологопровідність матеріалу та механізми видалення зв'язаної вологи.

Швидкість сушіння значно зменшується.

Розуміння цих періодів є важливим для оптимізації процесів сушіння, зменшення енерговитрат та забезпечення рівномірної якості готового продукту.

### **2.3 Основи розрахунків сушарки сільськогосподарської продукції**

При здійсненні теоретичних процесів сушіння будемо вважати, що сушильна камера у якій використовується теплоносій – повітря, не здійснюється додатковий підігрів та відповідно не відбувається втрат поданого тепла (рис.2.2).

Теплоносій, при подачі у сушильну камеру здійснює передачу тепла вологому матеріалу, при цьому буде відбуватись процес нагрівання вологого матеріалу та випаровування вологи, а пари що утворюються із теплом, яке передалось повітрям будуть змішуватись із ним. Відповідно до цього тепловміст буде залишатись постійним, але показники температури його будуть нижчими [9].



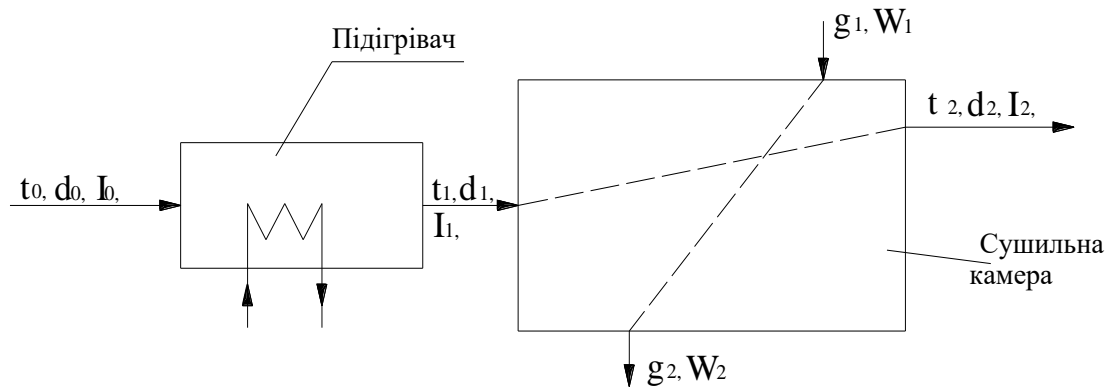


Рис.2.2 - Схема сушильної установки з нормальним сушильним процесом.

Повітря що виходить із сушильної камери відповідає наступним параметрам:  $t_2, d_2, I_2, \varphi_2$ . Відповідно  $d_2 > d_1$ ;  $\varphi_2 > \varphi_1$ ,  $t_2 < t_1$ , але  $I_1 = I_2$ .

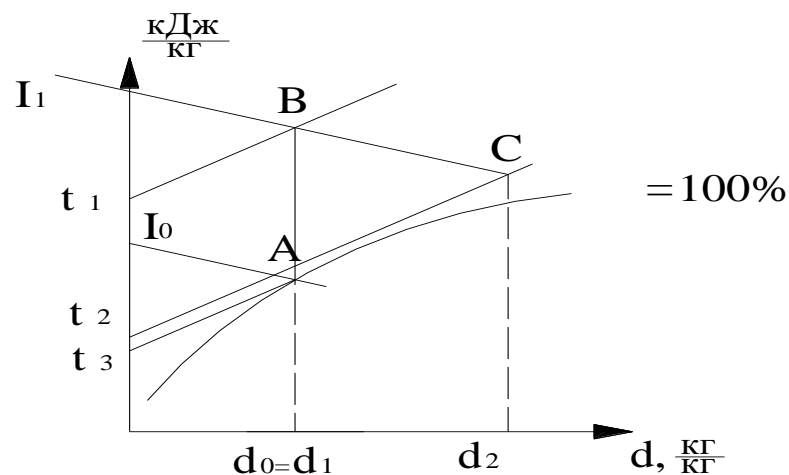


Рис. 2.3 – Діаграма процесу сушіння

I-d діаграми (рис.2.3) відображає теоретичні процеси сушіння, які зображені лінією постійної ентальпії, тобто  $I = \text{const.}$ , а точка С буде характеризувати теплоносій (повітря) на виході із сушильної камери, процеси підігріву у підігрівнику відображаються лінією АВ при  $d_1 = d_0$ .

Точка А відображає показник стану повітря при вході у підігрівник.

Визначення витрати сухого повітря на 1кг випаровування води:

$$\ell = \frac{1}{d_2 - d_1} = \frac{1}{d_2 - d_0} \quad (2.5)$$

Показники вологовмісту  $d_1$  і  $d_2$  визначаються згідно I-d діаграми.

Витрати тепла на 1 кілограм випаровуваної води:

$$g = \ell(I_1 - I_0) = \frac{I_1 - I_0}{d_2 - d_1} \quad (2.6)$$

Матеріальний баланс згідно реальних процесів сушіння:

$$L + Ld_0 + m_1 = L + Ld_2 + m_2, \quad (2.7)$$

де  $m_1$  - витрати по вологому матеріалу, кг/год.;  $m_2$  - витрати по висушеному матеріалу, кг/год.;  $L$  – витрати по сухому повітрі;

Згідно із рівнянням по матеріальному балансі:

$$m_1 - m_2 = Ld_2 - Ld_0 = L(d_2 - d_0) \quad (2.8)$$

Відображаємо  $W = m_1 - m_2$ , тоді  $L = \frac{W}{d_2 - d_0}$

Тепловий баланс визначають згідно:

$$Li_1 + m_1 C_1 Q_1 + m_{mp} C_{mp} Q'_{TP} + g_{\text{доо}} = Li_2 + m_2 C_2 Q_2 + m_{mp} C_{mp} Q''_{TP} + Q_{BT} \quad (2.9)$$

Відповідно

$$L(i_2 - i_1) = m_1 C_1 Q_1 + m_{mp} C_{mp} Q'_{TP} + g_{\text{доо}} - m_2 C_2 Q_2 + m_{mp} C_{mp} Q''_{TP} - Q_{BT} \quad (2.10)$$

або

$$L(i_2 - i_1) = \Sigma Q, \quad (2.11)$$

$$i_2 = i_1 + \frac{\Delta}{\ell}, \quad (2.12)$$

де  $\Delta$  - показник витрати теплоти, при внесенні у камеру сушарки або витрата, Дж на 1кг випареної води.

$\Delta$  може бути додатною або від'ємною в залежності від значення складових теплового балансу. В частковому випадку, коли величини із знаком „-” рівні величинам із знаком „+”  $\Delta = 0$ , а отже  $i_1 = i_2$ .

Тепловий баланс сушарки відображається таблицею.

Таблиця 2.1 – Тепловий баланс сушарки

Прихід		Витрата	
Статті приходу	Позначення	Статті витрат	Позначення
1. Теплота, яка вноситься з повітрям і яка складається із теплоти, що вноситься в підігрівник повітрям, і теплоти, що вводиться в підігрівник. 2. Теплота, що вноситься матеріалом ( $C_1$ - теплоємність, $\text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$ ; 3. $\theta_1$ - його температура). 3. Теплота, що вноситься транспортними пристроями. 4. Додатково теплота, що вводиться в камеру.	$Ll = L$ $Li_1 = Li_0 + Q_r$	Теплота, що вноситься повітрям, яке виходить в сушарки.	$Li_2$
	$m_1 C_1 Q_1$	Теплота, що вноситься висушеним матеріалом.	$m_2 C_2 Q_2$
	$m_{mp} C_{mp} Q'_{TP}$	Теплота, що вноситься транспортними пристроями.	$m_{mp} C_{mp} Q''_{TP}$
	$g_{\text{дод}}$	Втрати теплоти в навколишній простір.	$Q_{em}$

### 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Експериментальні методи проведення дослідження

Описаний процес дослідження сушіння є комплексним і включає дві частини: сушіння в експериментальних касетах і на стрічці. Метою експериментів було вивчення кінетики сушіння сипучої сировини (соя, соняшник, кукурудза) за допомогою інфрачервоного (ІЧ) та надвисокочастотного (НВЧ) нагріву. Дослідження передбачали використання спеціально розробленого стенду для вивчення впливу параметрів енергопідводу на процес сушіння.

Стенд базується на стрічковій сушарці, що включає:

- Стрічковий транспортер.
- Бункери для завантаження і розвантаження сировини.
- Три НВЧ-генератори та три ІЧ-нагрівачі.
- Ваги для вимірювання маси.
- Безконтактний вимірювач температури (пірометр VENETECH GM320).

Стенд дозволяє досліджувати сушіння у русі, імітуючи реальні умови роботи сушарок із комбінованим підведенням енергії.

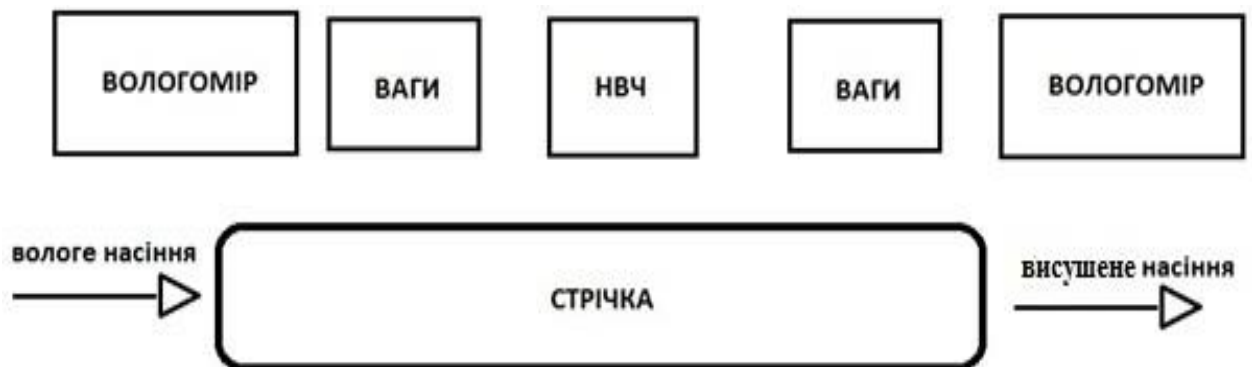


Рис. 3.1 – Схема стенду для випробування нагріву сировини НВЧ полем

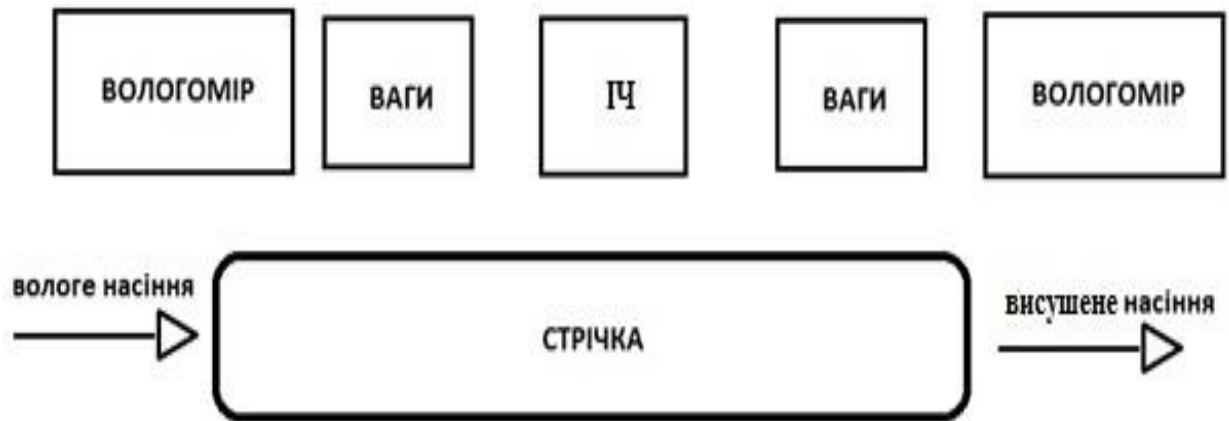


Рис. 3.2 – Схема стенду для випробування нагріву сировини ІЧ полем

### **Перша частина експерименту: сушіння у касетах**

#### **1. Обладнання і підготовка:**

На стрічці сушарки розміщували 8–10 касет, кожна з яких містила зразки зерен із різною вологістю. Маса касет та зерен вимірювалась електронними вагами. Температура зерна вимірювалась пірометром.

Досліди проводились при різних режимах нагріву. Вимірювались маса зерен, температура шару, а також параметри сушильного агента. Зміна маси зерен у касетах визначала кількість видаленої вологи.

#### **2. Обробка даних:**

- Результати експерименту фіксувались у таблицях.
- Виконувались побудови графіків кінетики сушіння (залежності вологості від часу) та термограм (залежності температури від часу).
- Проводився аналіз впливу інтенсивності нагріву та маси шару на процес вологовидалення.

### **Друга частина експерименту: сушіння на стрічці**

#### **1. Підготовка сировини:**

Зерно зважувалось на вагах. Початкова вологість визначалась вологоміром WILE66, а температура продукту — пірометром.

#### **2. Процес сушіння:**

Зерно завантажувалось у приймальний бункер стрічкової сушарки. Проводились випробування за різних режимів роботи ІЧ та НВЧ джерел нагріву. Паралельно реєструвались дані температури, вологості та маси продукту.

### 3. Аналіз результатів:

- Досліджувались залежності швидкості сушіння від параметрів нагріву.
- Вивчався вплив продуктивності сушарки (завантаження стрічки) на ефективність процесу.

**Кінетика сушіння** - графіки показують зміну вологості у часі, залежно від режимів сушіння.

**Ефективність нагріву** - ІЧ та НВЧ джерела продемонстрували різний вплив на швидкість сушіння та рівномірність нагріву.

**Оптимізація режимів** - встановлено оптимальні параметри енергопідводу для зменшення часу сушіння та збереження якості продукту.

**Масштабування результатів** - отримані залежності можуть бути використані для розрахунків повномасштабних сушарок із застосуванням критеріальних рівнянь.

Цей експериментальний підхід дозволяє комплексно вивчити вплив комбінованих методів сушіння (ІЧ та НВЧ) та сприяє розвитку технологій енергоефективної переробки сільськогосподарської продукції.

## 3.2 Методи визначення вологості сільськогосподарської продукції

Визначення вологості зерна та інших сипучих матеріалів є важливим етапом оцінки їх якості, а для забезпечення точності вимірювань необхідно правильно організувати процес відбору проб та вибору методу визначення вологості.

Приймання та відбір проб згідно з ГОСТ 13586.3-83, зерно приймається партіями, які визначаються як однорідні за якістю обсяги продукції, що

призначені для одночасного приймання, зберігання або транспортування. Для аналізу готується середня проба, яка репрезентує всю партію.

Методи визначення вологості поділяються дві основні групи методів:

1. Прямі методи — базуються на безпосередньому виділенні та вимірюванні води.
2. Непрямі методи — визначають величини, функціонально пов'язані з вологістю матеріалу.

Прямі методи - теплофізичні методи, в основі лежить випаровування води з матеріалу. Різниця між початковою масою і масою після висушування показує кількість вологи.

Дистиляційні методи, застосовуються для відводу води разом з органічним розчинником, який не змішується з водою.

Хімічні методи, використовують реактиви, які взаємодіють з водою (наприклад, реактив Фішера). Визначення вологості ґрунтується на кількості речовини, що утворилася після реакції.

Непрямі методи - метод електропровідності, базується на залежності питомого електричного опору зерна від його вологості. Зі збільшенням вологості зменшується опір, а електропровідність зростає.

Термогравіметричні методи, найпоширеніші серед непрямих, базуються на тому, що матеріал зважують, висушують до постійної маси, охолоджують та знову зважують.

Застосовують прискорене висушування або використання інфрачервоного випромінювання.

Метод діелектричної проникності заснований на різниці діелектричних проникностей води (81) та сухих речовин (3–5), із зростанням вологості зростає діелектрична проникність матеріалу.

Переваги термогравіметричних методів - простота та доступність, не потребують дорогого обладнання чи хімічних реактивів, широко використовуються у виробничих умовах.

До недоліків відносять: результат залежить від методу визначення вологості: іноді розраховується умовна, а не істинна масова частка вологи.

Незважаючи на різноманітність методів, термогравіметричні методи залишаються найбільш популярними через їх простоту та зручність. Для точного визначення вологості рекомендується використовувати кілька методів (прямий та непрямий) для взаємної перевірки результатів.

Масова частка вологи  $W$ , %, визначається згідно формули:

$$W = \frac{G_1 - G_2}{G_1} * 100, \quad (3.1)$$

де,  $G_1$ - початкова маса, г;  $G_2$ - кінцева маса після висушування, г.

Використання термогравіметричних методів набуло широкого використання завдяки простоті і зручності, а також не потребують застосування хімічних реактивів і складного обладнання.

### **3.3 Методика визначення параметрів процесів теплообміну**

Методика дослідження процесів теплообміну в мікрохвильових (МХ) та інфрачервоних (ІЧ) камерах передбачає:

#### **1. Налаштування вихідних параметрів**

Для проведення експериментів засобами пульта управління встановлювались такі вихідні параметри: потужність магнетрону, визначалась через параметр «довготривалість імпульсу» ШІМ-сигналу, крок регулювання потужності — 10%, максимальна електрична потужність магнетрону — 800 Вт., тривалість експерименту при низькій інтенсивності нагріву — до 60 хвилин, а при високій інтенсивності — 30–60 хвилин.

#### **2. Фіксація параметрів електричної енергії**

Використовувався універсальний цифровий вимірювальний прилад (мультиметр) для контролю електричних параметрів, напруга мережі



вимірювалась до початку експерименту, споживаний струм фіксувався в моменти активації магнетрону.

Потужність, спожита камерою, визначалася як різниця між потужністю випромінювачів та потужністю схеми управління (у режимі простою).

### 3. Проведення експериментів:

- Порожня касета зрівноважувалась на електронних вагах, надалі рівномірно висипались зразки зерна сої, соняшника та кукурудзи (маса зразків 50 г або 100 г згідно з планом випробувань). Встановлення касети на рухому стрічку сушарки, після чого запускались МХ та ІЧ камери;

- Фіксація показників під час нагріву, кожен п'ятий прохід стрічки визначалась вага продукту (електронними вагами), вимірювалась температура продукту через кожні 5 хвилин (ручний пірометр), вологість (вологомір WILE66) для повного завантаження стрічки;

- Завершення циклу випробувань, дані вимірювань вносились у таблицю для подальшого аналізу;

- На основі отриманих даних будувались залежності: температура продукту від часу, зниження вологості зразків від кількості енергії, що подавалась, інтенсивність теплообміну та зменшення маси зразків у залежності від режиму роботи камер.

4. Особливості методики - використання комбінованих джерел нагріву (МХ і ІЧ) дозволяє досліджувати різні режими сушіння. Рівномірне нагрівання забезпечувалось завдяки руху стрічки, контроль вологості та температури зразків забезпечував високу точність вимірювань і репрезентативність результатів.

Ця методика є ефективним інструментом для дослідження процесів сушіння, визначення оптимальних режимів роботи сушарок, а також вивчення кінетики видалення вологи із зернових матеріалів.

Показник теплоємності вологовмісного матеріалу, рівний сумі теплоємності абсолютно сухих речовин досліджуваного матеріалу та води, та визначається згідно формули:

$$C_3 = \frac{100 - \omega}{100} * C_0 + \frac{\omega}{100} * C \quad (3.2)$$

де  $C_0$  - показник теплоємності для абсолютно сухих речовини,  
 $C_0 = 1,32 \text{ кДж}/(\text{кг} * \text{К})$ ;  $C$  - показник питомої теплоємності води,  
 $C = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} * \text{К})$ .

Показник теплового потоку, що використовується для нагрівання визначають згідно формули:

$$Q = G * C * (t_2 - t_1) \quad (3.3)$$

Коефіцієнти тепловіддач ( $\text{Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$ ) випромінювачем зразку що висушується визначають згідно формули:

$$\alpha = \frac{N_3}{F * t_c} \quad (3.4)$$

де  $N_3$  - показник споживаної електричної потужності із врахуванням ККД магнетрона, Вт;

$F$  - показник площі поверхні зерна, де здійснюється генерація теплф,  $\text{м}^2$ ;  $t_c$  - температурні показники у шарі зерна,  $^{\circ}\text{К}$ .

### 3.4 Методика по визначенню параметрів процесу масообміну

Дослідження здійснювались на зразках зерна сої, соняшника і кукурудзи, які мали постійні початкові показники вологості. Послідовність здійснення досліджень регламентувалась наступними кроками:

1. Із використанням електронного вологоміра здійснювали визначення початкових показників вологості  $W_n$ .

2. Приймали зерно із високими показниками вологості на рівні 20-21 (25max)%. Необхідну кількість води  $W$ , що потрібна для доведення до цих показників визначали згідно формули:

$$W = G_n * \frac{w_k - w_n}{100 - w_k} \quad (3.5)$$

де  $G_n$  – показник маси зерна перед зволоженням, кг;  $W_n$  – початкові показники вологості, %;  $W_k$  – кінцеві показники вологості зерна після процесу зволоження, %.

До вихідного зерна, яке поміщали у відповідну посудину, інтенсивно перемішуючи рівномірно додавали розраховану кількість води. Отриману масу поміщали у холодильник, де вона зберігалась при відповідних умовах, зокрема температура від 3 до 5<sup>0</sup>С протягом двох діб, крім цього здійснювали перемішування три рази у день. Надалі вологий матеріал був готовий для проведення подальших досліджень.

Обробка отриманих результатів досліджень, побудова діаграм та графіків процесів кінетики сушіння здійснювалась із використанням наступної методики:

1. Програмна обробка визначення маси зразків на лабораторних вагах здійснювалась із використанням програмного забезпечення MS Excell. На основі цього формували таблицю даних досліджень, у якій відображали результати по вимірюванню температури досліджуваної маси та інші параметри.

2. Згідно цих даних здійснювали формування таблиці, згідно якої будували часову залежність вологовтрати та температури.

3. Отримані дані із використанням штатних засобів та електронні таблиці, здійснювали побудову діаграми по кінетиці сушіння та термограм.

4. Подальша обробка отриманих результатів надала змогу побудову залежностей процесів вологовтрат та інтенсивностей нагріву зерна від величин енергопідводів та маси при навантаженні стрічки.

### 3.5 Аналіз досліджуваної установки стрічкової сушарки

Стрічкова установка сушіння сільськогосподарської продукції із використанням електромагнітного поля мікрохвильового (МХ) та інфрачервоного (ІЧ) випромінювання (рис. 4.3) призначена для сушіння рослинної продукції. Установка забезпечує регулювання швидкості руху стрічкового конвеєра та його вантажопідйомності в межах від 0,007 до 0,025 м/с. Потужність випромінювачів налаштовується покроково в діапазоні від 30% до 100% від номінального значення магнетрона. Конструкція сушарки включає послідовні зони дії мікрохвильового та інфрачервоного випромінювання. Регулювання потужності здійснюється за допомогою імпульсної модуляції. Зовнішній вигляд пристрою показано на рис. 4.3.

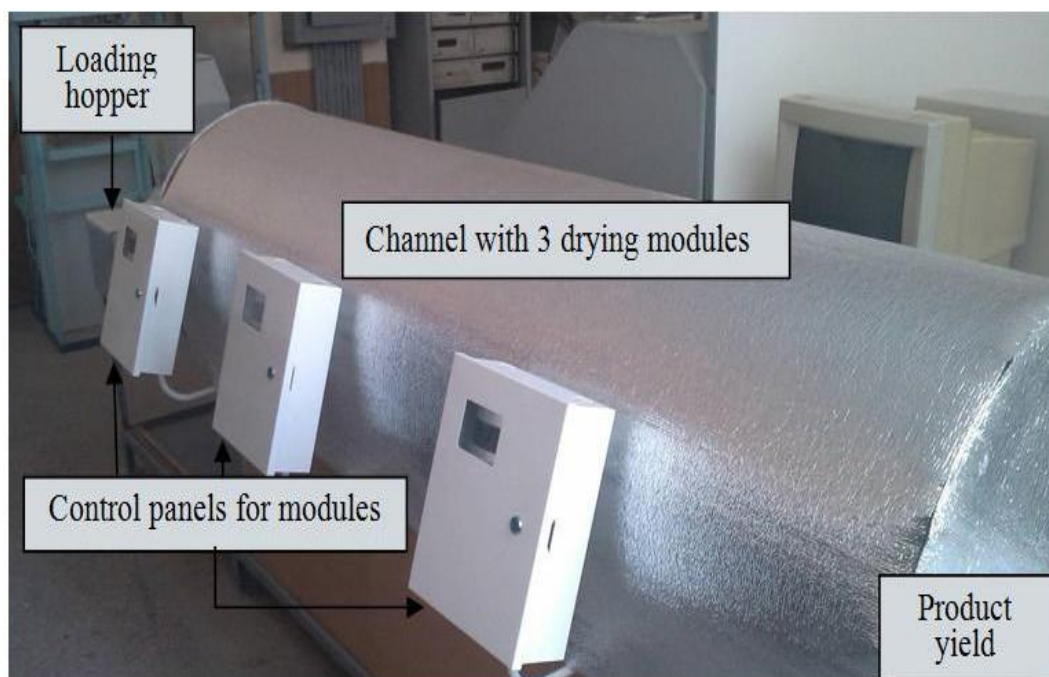


Рисунок 4.3 – Стрічкова МХ і ІЧ експериментальна сушарка

Процес сушіння починається із завантаження сировини через бункер, звідки вона надходить на стрічковий конвеєр. Сировина проходить через три групи МХ та ІЧ модулів, де по черзі піддається впливу мікрохвильового та інфрачервоного випромінювання. Висушений продукт потрапляє в бункер вивантаження. Корпус установки вкритий теплоізоляційним матеріалом для зменшення втрат енергії.

Особливістю цієї сушарки є спосіб нагріву: рухомий, щільний шар сировини прогрівається завдяки властивостям вологого діелектричного матеріалу зерен, які поглинають енергію мікрохвильового та інфрачервоного випромінювання. Волога, що випаровується з поверхні зерна, видаляється за допомогою повітряного потоку, який виводить її за межі сушильних камер.

Експериментальна установка має розрахункову продуктивність 58 кг/год при зниженні вологості продукту з 25% до 14%.

## 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

### 4.1 Результати досліджень впливу питомої потужності на кінетику сушіння та температуру матеріалу

При перевірці висунутих гіпотез було проведено дослідження пілотного зразка сушарки НВЧ+ІЧ типу, а у рамках експерименту вивчали вплив підведеної енергії на середню швидкість сушіння сільськогосподарської продукції. Дослідження здійснювались за умов швидкості руху стрічки транспортера 0,04 м/с, питомого завантаження 3,96 кг/м<sup>2</sup> на один модуль. Визначення питомої вологи здійснювали шляхом вимірювання початкової та кінцевої вологості, а показники швидкості сушіння розраховували на основі кількості вологи та тривалості впливу випромінювання на продукт.

Отримані криві сушіння пілотного зразка промислової стрічкової сушарки з комбінованим мікрохвильовим (НВЧ) та інфрачервоним (ІЧ) підведенням енергії (рис. 4.1) за своєю формою не відрізнялися від результатів лабораторних експериментів. Експерименти проводилися за участю трьох ІЧ і трьох НВЧ модулів при швидкості руху продукту 0,04 м/с, питомому завантаженні 3,96 кг/м<sup>2</sup>, а також при підведеній питомій потужності від 7 до 11 кВт/м<sup>2</sup>.

У ході дослідження було встановлено, що при збільшенні питомої потужності випромінювання у 1,5 рази швидкість сушіння соняшника змінюється від 1 до 2,15%/хв (рис. 4.1). Час сушіння до досягнення відносної вологості продукту 6-7% становив від 30 до 60 хвилин. Продуктивність сушарки за умов питомого завантаження соняшника 3,96 кг/м<sup>2</sup> та швидкості конвеєра 0,04 м/с досягла 50 кг/год сухого зерна із вологістю 6,5%.

Важливо зазначити, що збільшення потужності в 1,5 рази не призводило до значного підвищення температури насіння соняшника на виході: максимальна температура не перевищувала 43°C (рис. 4.2).

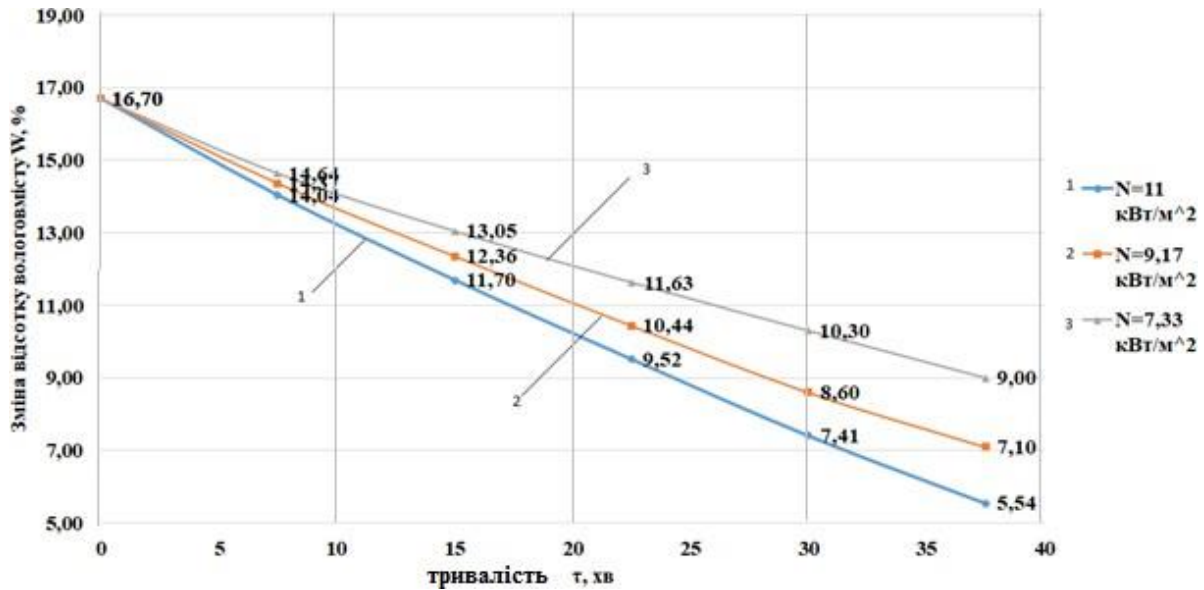


Рис. 4.1 – Вплив питомої потужності на кінетику сушіння соняшнику

Збільшення кількості модулів підвищує тривалість перебування продукту під дією випромінювання і дозволяє використовувати більш високу швидкість руху продукту, що, в свою чергу, веде до підвищення продуктивності установки.

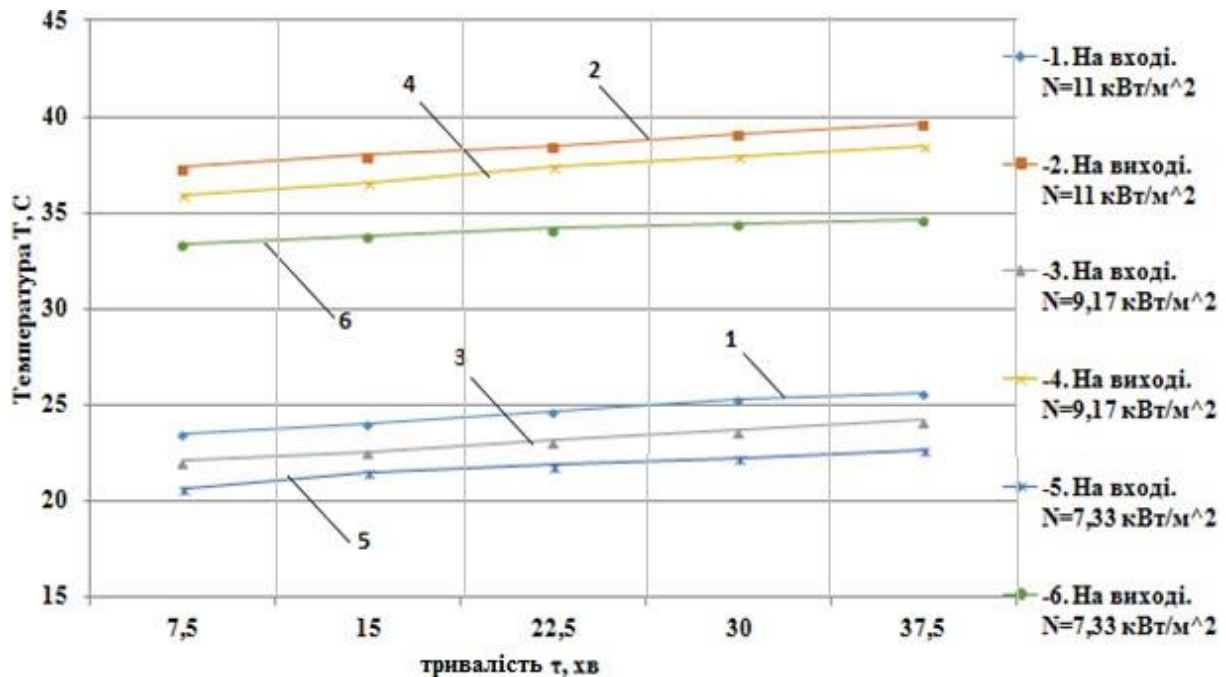


Рис. 4.2 – Вплив питомої потужності на температуру соняшнику

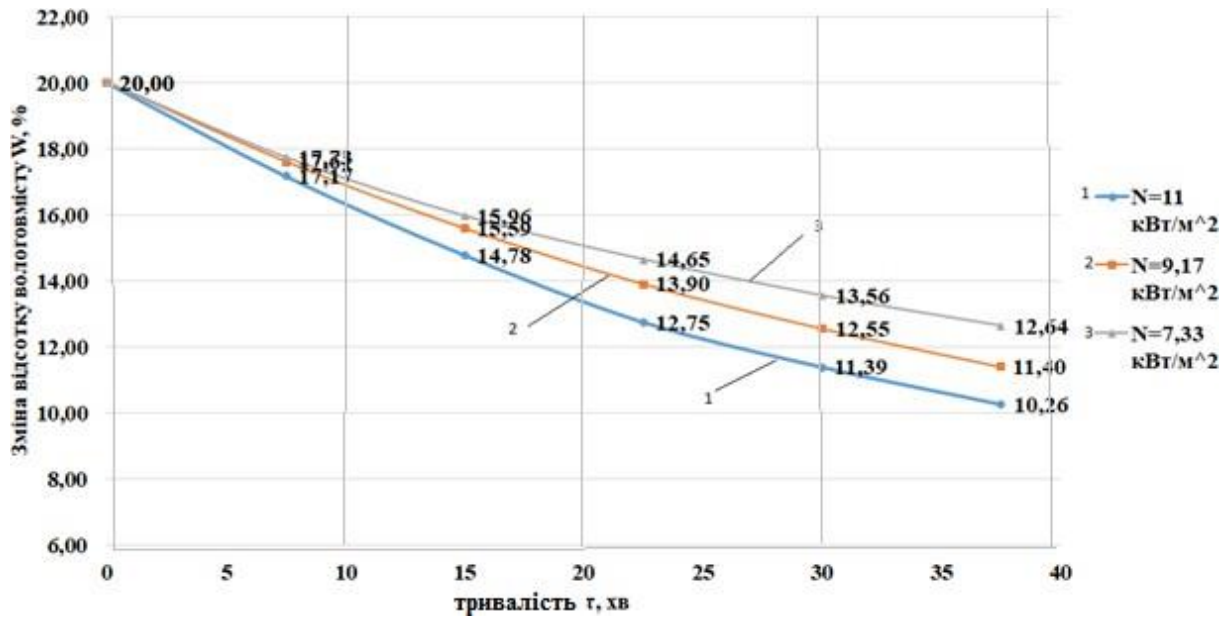


Рис. 4.3 – Вплив питомої потужності на кінетику сушіння сої

Було також проведено дослідження сушарки для обробки сої, зокрема дослідження здійснювались при швидкості руху стрічки транспортера 0,04 м/с та питомому завантаженні 4,8 кг/м<sup>2</sup>. Основною метою було дослідити вплив питомої потужності підведеної енергії на кінетику сушіння сої (рис. 4.3). Кількість питомої вологи визначали шляхом вимірювання початкової та кінцевої вологості продукту.

Результати досліджень показали, що збільшення питомої потужності від 7,33 до 11 кВт/м<sup>2</sup> (рис. 4.3) скорочує тривалість сушіння до досягнення відносної вологості продукту 7-8% із 70 до 40 хвилин. Одночасно швидкість сушіння підвищується з 0,6 до 1,9%/хв. Продуктивність установки при питомому завантаженні 4,8 кг/м<sup>2</sup> та швидкості руху продукту 0,04 м/с склала 55 кг/год сухого зерна із вологістю 8%.

Температура сої на виході з сушарки не перевищувала 41°C (рис. 4.4), що відповідає технологічним вимогам. Питоме завантаження регулюється за допомогою шлюзового механізму бункера, що забезпечує зміну товщини шару продукту. Установка дозволяє проводити процес сушіння в діапазоні питомого завантаження від 4,8 до 9,6 кг/м<sup>2</sup>.



Досліди виконувалися із залученням трьох НВЧ і трьох ІЧ модулів за питомої потужності кожного модуля на рівні 7,33, 9,17 і 11 кВт/м<sup>2</sup> при сталій швидкості транспортування продукту 0,04 м/с і завантаженні 4,8 кг/м<sup>2</sup>.

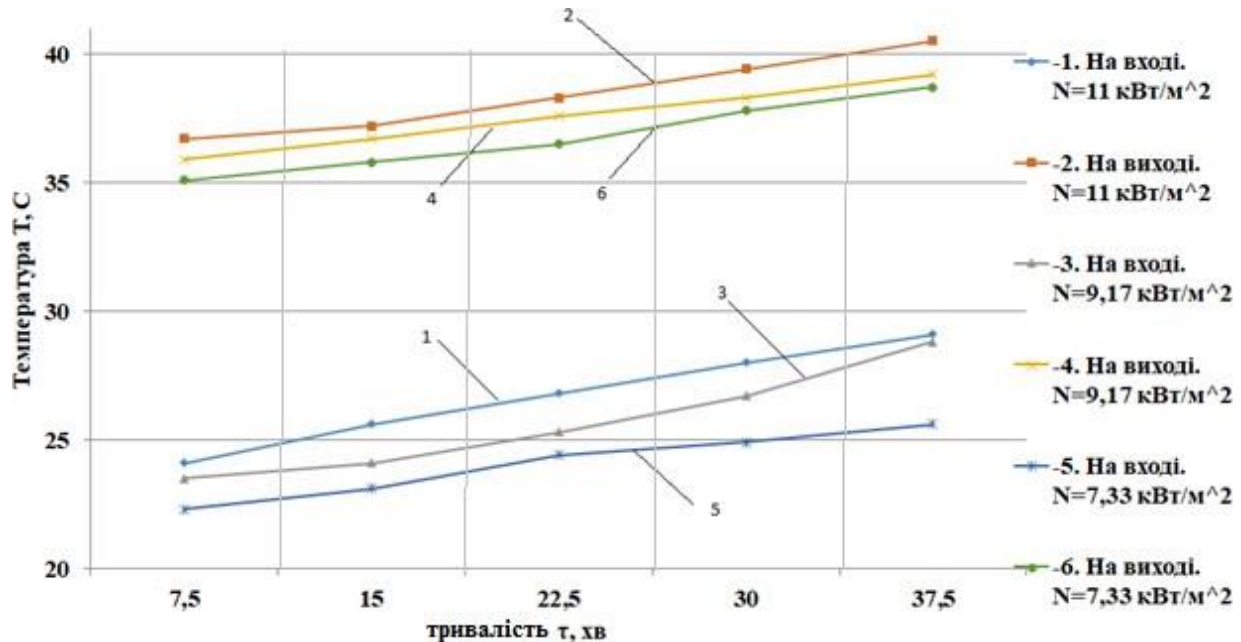


Рис. 4.4 – Вплив питомої потужності на температуру сої

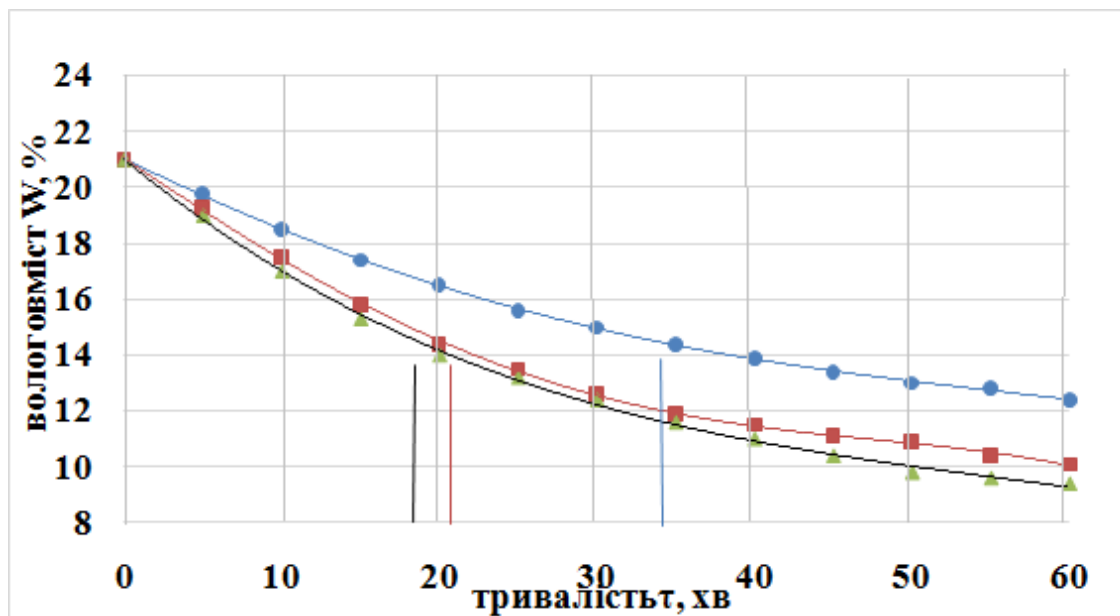


Рис. 4.5 – Вплив питомої потужності на кінетику сушіння кукурудзи

● N= 11 кВт/м<sup>2</sup>, ■ N= 9,15 кВт/м<sup>2</sup>, ▲ N= 7,33 кВт/м<sup>2</sup>

Дослідження із сушіння кукурудзи проводилися за умов швидкості руху продукту 0,025 м/с та питомого завантаження 3,96 кг/м<sup>2</sup>, а показники

підведеної питомої потужності кожного модуля становив 7,33, 9,17 і 11 кВт/м<sup>2</sup>. Основним завданням досліджень було визначення впливу підведеної енергії на середню швидкість сушіння кукурудзи.

Результати показали, що за досліджених значень питомої потужності (рис. 4.5) тривалість сушіння до досягнення відносної вологості продукту 14% становить 20-30 хвилин. Збільшення підведеної потужності у 1,5 рази призводить до підвищення швидкості сушіння на 50%. Продуктивність установки при питомому завантаженні 3,96 кг/м<sup>2</sup> та швидкості руху продукту 0,025 м/с досягла 78 кг/год сухого зерна із вологістю 14%.

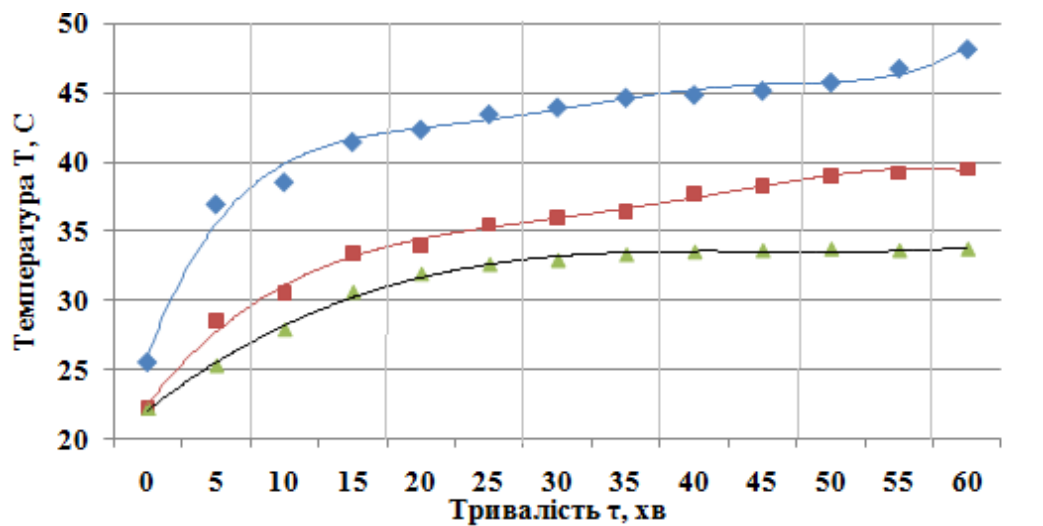


Рис. 4.6 – Вплив питомої потужності на температуру сої  
 $N=11$  кВт/м<sup>2</sup>,  $\blacksquare$   $N=9,15$  кВт/м<sup>2</sup>,  $\blacktriangle$   $N=7,33$  кВт/м<sup>2</sup>

#### 4.2 Результати досліджень енергетичних характеристик досліджуваної сушарки

Основний показник, який характеризує енергетичні показники являються показники питомих витрат енергії на кілограм видаленої вологи (рис. 4.7).

Значення питомих витрат енергії на кілограм видаленої вологи різні культури мають різне. Це пов'язане із особливістю їхньої будови. При цьому важливо відзначити, що відбувається зростання питомого енергоспоживання із

збільшенням швидкості сушіння за рахунок збільшення потужності випромінювання, а, відповідно і питомого навантаження. Оптимальні значення показників питомого енергоспоживання - 2,55 МДж/кг. досягаються при сушінні сої із питомою потужністю випромінювання - 7,33 кВт/м<sup>2</sup>.

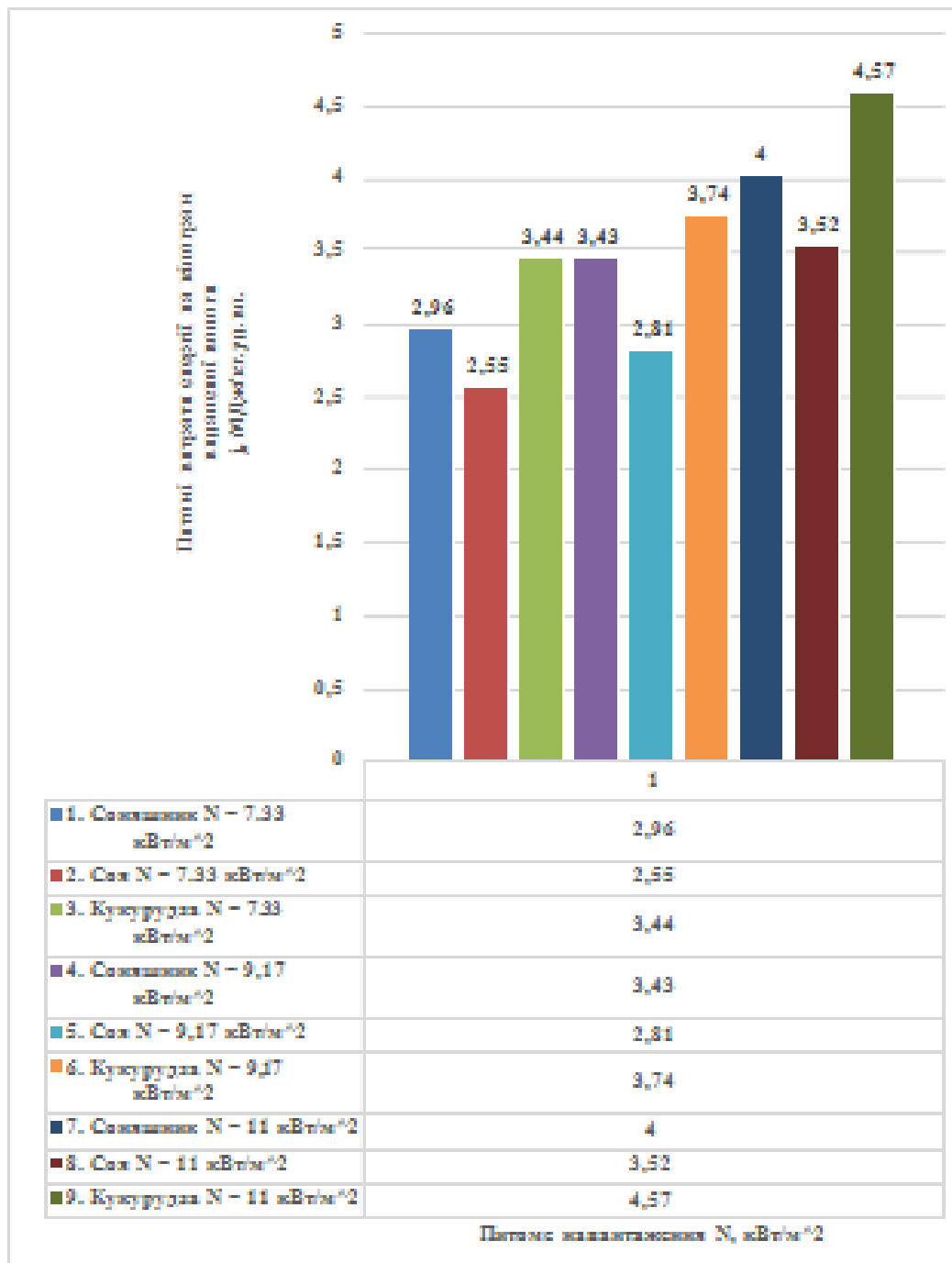


Рис. 4.7– Питомі витрати енергії на кілограм видаленої вологи

Також було здійснено порівняння питомих витрат енергії на процес сушіння для тих самих культур за умов використання тільки інфрачервоного

(ІЧ) випромінювання та тільки мікрохвильового (НВЧ) випромінювання. Досліди проводилися при питомій потужності 7,3 кВт/м<sup>2</sup> (рис. 4.8) та 9,15 кВт/м<sup>2</sup> (рис. 4.9).

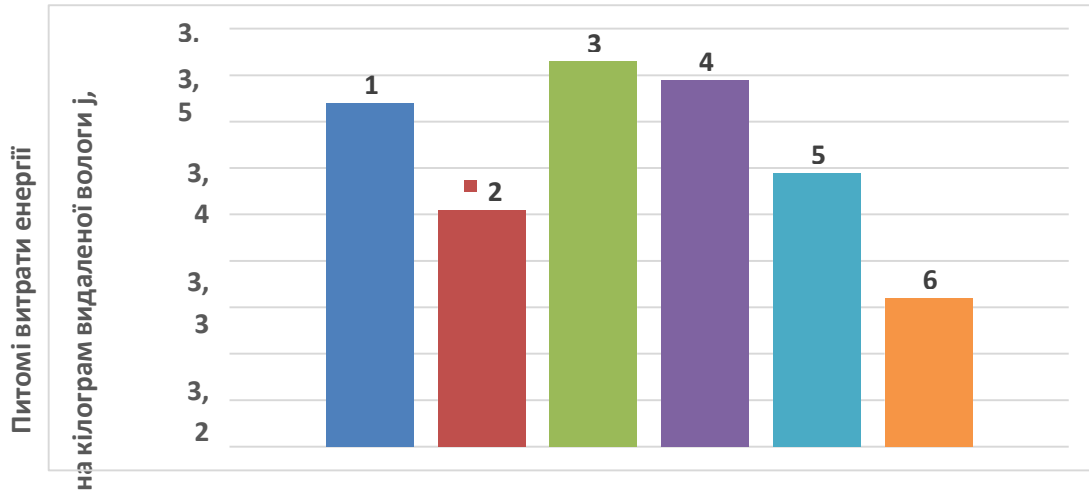


Рис. 4.8 – Порівняння питомих витрат енергії на кілограм видаленої вологи при підведенні теплоти НВЧ або ІЧ випромінюванням з питомою потужністю 7,33 кВт/м<sup>2</sup>. 1,2 соняшник, 3,4 кукурудза, 5,6 соя; 1,3,5 ІЧ випромінювання, 2,4,6 НВЧ випромінювання

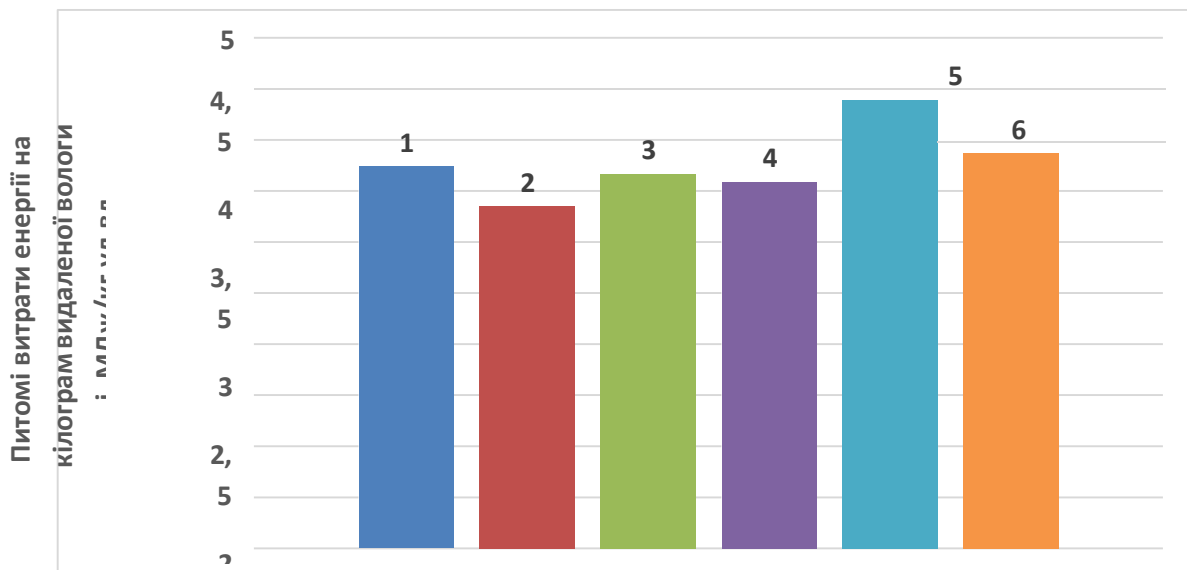


Рис. 4.9– Порівняння питомих витрат енергії на кілограм видаленої вологи при підведенні теплоти НВЧ або ІЧ випромінюванням з питомою потужністю 9,15 кВт/м<sup>2</sup>. 1,2 соя, 3,4 соняшник, 5,6 кукурудза; 1,3,5 ІЧ випромінювання, 2,4,6 НВЧ випромінювання

Результати досліджень показали, що незалежно від виду продукту питомі витрати енергії під час сушіння в мікрохвильовому полі надвисокої частоти були нижчими порівняно з витратами енергії при сушінні за допомогою ІЧ випромінювання. Це свідчить про вищу енергоефективність НВЧ технології для сушіння сільськогосподарської сировини.

Збільшення питомої потужності випромінювання сприяє зменшенню різниці у витратах енергії на видалення 1 кг вологи при використанні різних методів підведення енергії. Це, ймовірно, пояснюється наявністю при сушінні в НВЧ полі так званого "механодифузійного ефекту" [4.3], за якого частина вологи видаляється з продукту в рідкому стані.

Однак із підвищенням потужності випромінювання рідка волога перетворюється на пар, що потребує додаткових витрат енергії для фазового переходу. Таким чином, ефективність енергозбереження НВЧ сушіння зменшується при високих рівнях підведеної потужності, наближаючись до витрат енергії ІЧ сушіння.

### **4.3. Зведені результати досліджень стрічкової НВЧ+ІЧ сушарки**

Результати досліджень у стрічковій установці для зневоднення рослинної сировини в електромагнітному полі підтвердили ефективність використання мікрохвильового (НВЧ) та інфрачервоного (ІЧ) сушильного обладнання. Такий підхід забезпечує високопродуктивний та екологічно чистий технологічний процес, що дозволяє зберігати вихідні якісні характеристики сировини за порівняно низьких енерговитрат.

Досліджувана стрічкова установка гарантує високу якість обробленого продукту при оптимальних енерговитратах, забезпечуючи дотримання екологічних вимог та технологічних стандартів.

Результати досліджень у стрічковій сушарці для зернової продукції відображено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Результати випробувань на стрічковій сушарці.

№	Продукт	Тип підведеної енергії	Рекомендовані параметри			Енерго витрати МДж/кг	Вологовміст	
			Потужність, кВт/м <sup>2</sup>	Завантаження стрічки, кг/м <sup>2</sup>	Швидкість стрічки, м/с		Початковий, %	Кінцевий, %
1	Кукуруза	ІЧ	7,33	3,96	0,025	3,29	21,1	13,8
		МХ	31,5	3,96	0,0071	3,55	21,1	13,5
2	Соя	ІЧ	11	3,96	0,025	3,6	25,0	10,8
		МХ	7,5	3,96	0,025	2,85	25,0	15,3
3	Соняшник	ІЧ	7,33	3,6	0,025	3,00	21,0	13,0
		МХ	7,5	3,6	0,025	3,21	21,0	13,7

## **5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ**

### **5.1 Аналіз виробничих небезпек під час виробництва**

При розробці заходів запобігання виробничому травматизму й захворюваності працюючих, спеціалістів найбільше цікавлять шкідливі та небезпечні виробничі фактори.

Небезпечні виробничі фактори поділяють на явні, якщо їх дія на людину очевидна і для її запобігання необхідні певні заходи і які потенційно можуть діяти на людину при певних її діях, виникненні аварій та в інших небезпечних умовах.

Так, спеціалісти в галузі безпеки праці стверджують, що виробнича небезпека – це загроза дії на працюючого небезпечних і шкідливих виробничих факторів, а виробнича шкідливість – дія на працюючого лише шкідливих виробничих факторів.

При встановленні причинно-наслідкових зв'язків між подіями, що призвели до травми працюючого, необхідно розрізнити поняття “нещасний випадок” і “травма”. Травма є випадковою подією внаслідок дії небезпечного виробничого фактора на людину. Поняття “нещасний випадок” пояснює достовірність факту виникнення травми, а тому його окремою подією вважати не можна.

У процесі роботи людина може потрапляти в небезпечну зону внаслідок відсутності там необхідного огороження, сигнальних пристроїв або попереджувальних знаків та написів, порушення відповідних правил, допущеної помилки або внаслідок аварії. При цьому виникає можливість дії на неї небезпечного виробничого фактора. Кожну дію, внаслідок якої людина потрапляє до небезпечної зони, позначено як небезпечну.

Вичерпні знання обставин, внаслідок яких виник нещасний випадок або може статися аварія, травм а чи більш важкі наслідки, необхідні для глибокого розуміння процесу зародження, нормування та виникнення небезпечних ситуацій – випадкових явищ, що передують травмам, аваріям, катастрофам.

Аналіз небезпечних умов, які існують чи виникають безпосередньо на виробництві показав, що їх можна поділити на групи, які:

- характеризують стан або рівень безпеки виробничого обладнання або певного робочого місця, конструктивні недоліки конкретного вузла чи машини, та інші;
- спонукають працюючого допускати помилок у процесі роботи, низька кваліфікація працюючого та рівень знань з охорони праці;
- відсутність відповідного контролю за дотриманням правил з охорони праці;
- створюють можливість проникнення працюючого у небезпечну зону.

Якщо внаслідок аварії технічної системи виникли травми у людей, то сам випадок травми необхідно розглянути як подію, що є наслідком аварії. Це стосується тих систем, у яких підсистемами одночасно є машина і людина. Якщо при функціонуванні таких систем з ладу вийшла машина, раптово припинивши свої функції внаслідок руйнування окремих деталей або самої машини, і це привело до значного матеріального збитку, то таке випадкове явище необхідно назвати аварією.

Всяке порушення аналітичної цілості організму або його функцій внаслідок дії на людину дії будь-якого небезпечного фактора визначається як травма.

Оскільки при функціонуванні людино-машинних систем такі явища як травми, аварії та катастрофи, мають дуже близькі механізми формування та виникнення, у подальшому ці явища будуть описуватись паралельно (рис.5.1).

Усі явища, що формують небезпечну ситуацію, мають повну достовірність виникнення, а це означає. Що небезпечні умови (НУ), небезпечні дії (НД), небезпечні ситуації (НС) і наслідки таких ситуацій: аварія(А), травми (Т) і сприятлива подія належить до випадкових явищ.



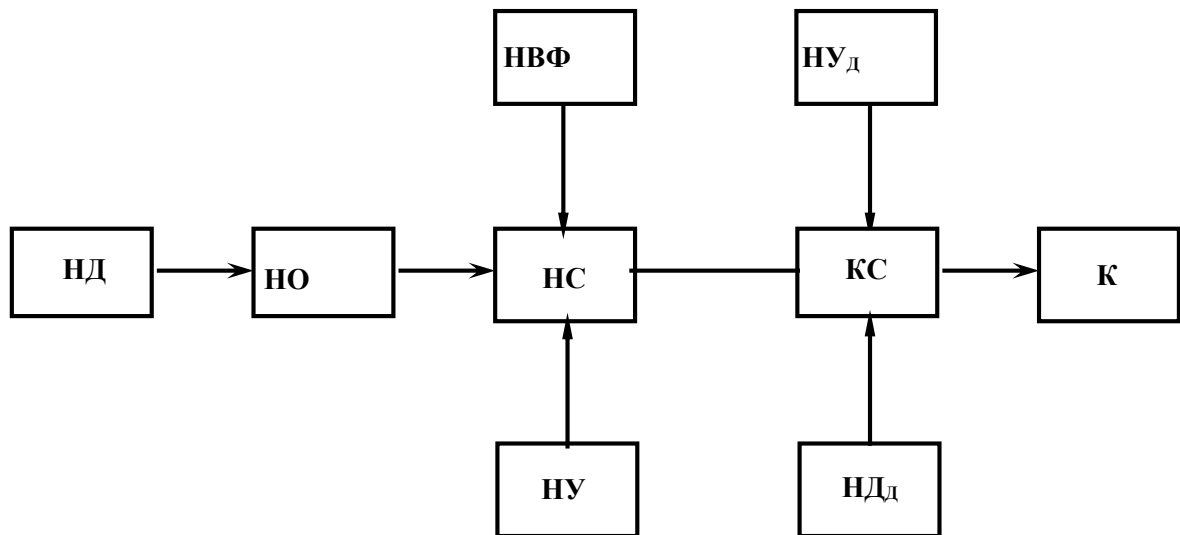


Рис. 5.1 - Блок-схема формування та виникнення травмонебезпечних аварійних та катастрофічних ситуацій: НВФ-небезпечний виробничий чинник; НУ-небезпечні умови; НД-небезпечні дії; НО-небезпечні обставини; НС-небезпечна ситуація; А-аварія; Т-травма; КС-критична ситуація; НУд-небезпечні умови додатково; НДд-небезпечні дії додатково; К-катастрофа.

## 5.2. Паспортизація санітарно-технічного стану та моделювання процесу виникнення травм та аварій

Базовим елементом паспортизації є карта умов праці, що відображає три групи факторів трудової, санітарно-гігієнічної і технічної безпеки.

Карта умов праці на робочому місці - це основа санітарно-технічного паспорту виробничої дільниці (бригади, майстерні, ферми тощо). До санітарно-технічного паспорту дільниці входить збірна інформація з карт умов праці на робочих місцях.

Складемо картку умов праці в подрібнювальному цеху, яку зобразимо в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Карта умов праці

№ фак- Тора	Фактори умов праці	Нормативне значення фактора		значення фактора	Коеф. Нормо забезпечення Кн.	Час дії фактора		Коеф. Небезпечності	
		ГДР	Нормативний документ			В год.	Тдф	Кдф	К
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Температура повітря								
1.1	взимку	- 14	ГОСТ	0 – (-10)	0.71	8	1	0.71	0.089
1.2	влітку	+ 26	12.1.005-88	25 – 30	1.13	8	1	1.13	0.14
2	Вологість повітря, %	40-60	ГОСТ	50	1.25	8	1	1.25	0.16
3	Швидкість руху повітря, м/с	0,3	ГОСТ	0,2	0.7	8	1	0.7	0.088
4	Виробничий шум, дБ	80	12.1.005-88	80 – 82	1.03	4	0.5	0.515	0.064
5	Вібрація загальна, дБа	99	ГОСТ	95	0.95	4	0.5	0.475	0.059
6.1	Освітлення:	70	ГОСТ	75	1.07	8	1	1.07	0.134
6.2	природне, %	95	12.1.003-86	96	1.01	8	1	1.01	0.126

Послідовність заповнення картки умов праці в подрібнювальному цеху:

- ГОСТ 12.1.005-88 визначається категорія робіт і оптимальні показники мікроклімату;
- за гігієнічною класифікацією праці та іншими джерелами визначається перелік умов праці на робочому місці, для яких з нормативних документів встановлюються гранично допустимий рівень або гранично допустима концентрація фактора (ГДК, ГДР), які заносяться в графу 2 таблиці 5.1; для кожного фактора умов праці проводиться за загально прийнятою методикою інструментальний замір фактичного значення фактора. Деякі фактичні дані можна взяти з матеріалів попередньо проведеної паспортизації у інженера з охорони праці господарства;
- визначається коефіцієнт нормо-забезпеченості:

$$K_n = 1 \pm \frac{A_B + A_H}{A_H}, \quad (5.1)$$

де  $A_B$  – вимірне значення фактора умов праці;  $A_H$  – нормативне значення фактора.

Знак «+» ставиться для розрахунку за гранична допустимим значенням нормативного параметра  $A_H$ ; знак «-» - з мінімально допустимим значенням  $A_H$ . Результати заносимо в гр. 5 таблиці 5.1.

Гранично допустиме значення коефіцієнта нормо забезпечення має дорівнювати одиниці. Якщо воно менше одиниці, то це означає, що діючий фактор умови праці вищий за гранично допустимий рівень і слід вжити заходів для зниження дії цього фактора, тим самим поліпшити умови праці.

Відповідно до технології виконання виробничого процесу встановлюється тривалість дії кожного фактора і результати заносяться у гр. 7 і 8 табл. 5.1.

Визначається коефіцієнт небезпеки дії  $K_{дф}$  від кожного фактора умов праці і від усіх діючих факторів  $K$ .

Ці коефіцієнти обчислюються за формулами:

$$K_{дф} = K_n * T_{дф}; \quad (5.2)$$

$$K = \frac{K_{дф}}{n}; \quad (5.3)$$

де  $T_{дф}$  - тривалість дії фактора;  $n$  - кількість факторів умов праці.

Результати підрахунків заносяться у гр. 9 і 10 табл. 5.1 – карти умов праці у подрібнювальному цеху.

Метод логічного моделювання процесів формування, виникнення небезпечних ситуацій та їх наслідків доцільно застосовувати для аналізу існуючих або потенційних небезпек, що виявленні при обстеженні робочих місць, окремих марок машин, агрегатів, а також різних споруд, будівель, виробничих процесів і технологій. Але, як показали дослідження, будь-яка аварія може бути наслідком однієї з багатьох потенційних небезпечних ситуацій або їх поєднання. Тому метод логічного моделювання не може бути застосований для моделювання складних аварій і катастроф. Обчислення рівняння безпеки можна спрямувати на удосконалення конструкції технічних засобів, на зниження їх безпеки, а також вживати термінових заходів для першочергового усунення небезпек з більш високим рівнем.

Аналіз умов, обставин та причин різних аварій, виробничих травм та деяких катастроф показав, що процеси формування та виникнення цих явищ можна задалегідь моделювати, застосовуючи метод побудови “дерева відказів” та помилок оператора людино-машинних систем у сільському господарстві. Так, побудовані операторні або логіко-імітаційні моделі травм при роботі.

Основні принципи побудови моделі такі. Виявляється виробництво, на якому вже були раніше або можуть статися аварії, виробничі травми чи катастрофи. За своєю формою так модель нагадує крону дерева, тому вона і одержала назву “дерево відказів і помилок”. Кінцеві події називають базовими.

Для побудови логіко-імітаційних моделей застосовують різні символи, що характеризують ті чи інші події. Як правило, побудова моделі починається з головної події, а наступні розміщують зверху вниз, аж до базових подій (рис. 5.2).

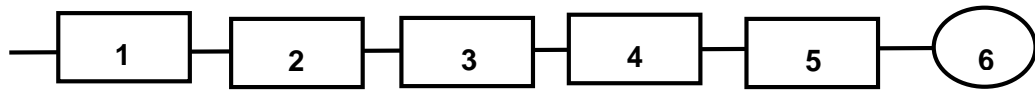


Рис. 5.2 - Схема побудови логіко-імітаційних моделей: 1- головна подія; 2-5- проміжні події; 6- базова подія.

Кожен блок рисунку, позначений відповідним номером, означає подію або окремий етап побудови моделі:

- 1 – відмова (аварія, травма) системи – головна подія;
- 2 – послідовність подій, що приводять до відмови системи;
- 3 – послідовність подій зображується за допомогою логічних операторів;
- 4 – усі вхідні і вихідні події, що входять до моделі, зображуються у вигляді прямокутників з відповідними написами всередині;
- 5 – послідовний підхід до базових подій, частоти виникнення яких відомі;
- 6 – базові події зображують у вигляді кружечків з написами всередині, вони є межею аналізу побудованої моделі.

### **5.3 Розробка логічно-імітаційної моделі процесу виникнення травм під час виробництва**

Проаналізувавши кожен із логічних моделей процесів формування та можливого виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій, завжди можна знайти подію з якої починається небезпечний процес ще до виникнення небезпечних наслідків.

Методикою оцінки рівня небезпеки робочих місць, машин, виробничих процесів та окремих виробництв передбачено пошук об'єктивного критерію рівня небезпеки для конкретного об'єкта. Таким показником вибрана ймовірність виникнення аварії, травми залежно від досліджуваного явища.

Для оцінки рівня небезпеки певного об'єкта чи явища можна застосувати метод обчислення ймовірності виникнення будь-якого випадкового явища, який широко застосовують в зарубіжній інженерній практиці. Основні його принципи полягають в тому, що на основі обстеження робочого місця чи окремої машини виявляють виробничі небезпеки, можливі аварійні або травматичні ситуації. При оцінці ситуацій визначають події, які можуть стати головною подією при побудові логічно-імітаційної моделі травми. Після цього будують модель “дерева відмов і помилок оператора”. При цьому важливе значення має правильний вибір головної події.

Головну подію (травма), модель якої нам необхідно побудувати, вибирають виходячи з оцінки відповідного об'єкта, виробництва чи окремої одиниці обладнання і змісту його найбільш небезпечного явища, яке за певних умов виробництва може виникнути.

Після вибору головного випадкового явища (події) розпочинаємо побудову моделі (“дерева”). Використовуючи оператора “і” та “або”, використовуємо набір ситуацій (відомих до цього), які можуть призвести до подій, вибраної як головна.

Після визначення відповідних травмонебезпечних ситуацій та їх кількості, визначаємо інші події, що входять до кожної такої ситуації, логічним аналізом із застосуванням операторів “і”, “або” та інших. Процес побудови моделі триває, поки не будуть знайдені усі базові події, що визначають межу моделі.

Слід мати на увазі, що кожна випадкова подія, до якої входять базові події, може формуватися й виникати при входженні у неї двох, трьох і більше базових подій за допомогою відповідних операторів.

Повністю побудована і перевірена модель підлягає математичній обробці для визначення ймовірності кожної випадкової події, що увійшла до моделі, починаючи з базових і закінчуючи головною.

Ймовірність базових подій визначаємо за даними виробництва. Наприклад, базова подія “стан контролю з охорони праці”. Для визначення ймовірності ми повинні встановити, наскільки (у відсотках) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об’єкті. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 50% або 30%, то ймовірність відповідно дорівнює 0,5 і 0,3. При відсутності контролю ймовірність “не здійснення контролю” становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідно ймовірність дорівнює 0.

Після обчислення ймовірності всіх подій, розміщених у ромбах, і базових подій, починаючи з лівої нижньої гілки “дерева”, позначаємо номерами всі випадкові події, що увійшли до моделі.

На цьому можна вважати, що певна модель підготовлена до математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логічно-імітаційної моделі

Отже, для побудови логіко-імітаційної моделі процесу, формування і виникнення аварії та травми для випадку технологічного процесу виробництва складемо список базових подій. Вони лежатимуть у основі даної моделі. Кожному пункту списку присвоюємо певне значення ймовірності виникнення. Нижче подано сам список:

1. Стан контролю з охорони праці .....  $P_1 = 0,2$ ;
2. Несерйозне відношення до проходження ТО .....  $P_2 = 0,1$ ;
3. Відсутність комплектуючих .....  $P_3 = 0,2$ ;
4. Невисока міцність .....  $P_4 = 0,03$ ;
5. Застаріле обладнання.....  $P_6 = 0,02$ ;
6. Попадання предметів з навколишнього середовища .....  $P_7 = 0,4$ ;
7. Досвід роботи .....  $P_{12} = 0,35$ .
8. Професійний рівень робітника .....  $P_{13} = 0,5$ ;

9. Психофізіологічний стан робітника .....  $P_{14} = 0,083$ ;

На основі даного списку будуємо матрицю логічних взаємозв'язків між окремими пунктами, графічне представлення якої зображено на рис. 5.3.

Розрахуємо ймовірності виникнення подій, що входять у дану логіко-імітаційну модель процесу виробництва (на прикладі ймовірності травми робітника, пов'язаної з ударом корпусу дробарки).

Ймовірність виникнення події  $P_5$  визначаємо наступним чином:

$$P_5 = 0,2 + 0,1 + 0,2 + 0,003 - 0,2 \cdot 0,1 - 0,2 \cdot 0,03 - 0,2 \cdot 0,03 - 0,1 \cdot 0,2 - 0,1 \cdot 0,03 - 0,2 \cdot 0,03 + 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 + 0,1 \cdot 0,2 \cdot 0,03 + 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 + 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,03 - 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 \cdot 0,03 = 0,314$$

Ймовірність виникнення події  $P_{10}$  визначаємо так:

$$P_{10} = 0,2 + 0,1 = 0,3$$

Ймовірність виникнення події  $P_{11}$  визначаємо:

$$P_{11} = 0,02 \cdot 0,314 \cdot 0,4 \cdot 0,3 = 0,00075$$

Ймовірність виникнення події  $P_{15}$  визначаємо наступним чином:

$$P_{15} = 0,35 \cdot 0,5 \cdot 0,083 = 0,0145$$

Ймовірність події  $P_{18}$ :

$$P_{18} = 0,5 + 0,083 = 0,58$$

Ймовірність події  $P_{19}$ :

$$P_{19} = 0,0145 \cdot 0,083 = 0,0012$$

Ймовірність події  $P_{20}$ :

$$P_{20} = 0,00075 + 0,0012 = 0,00195$$



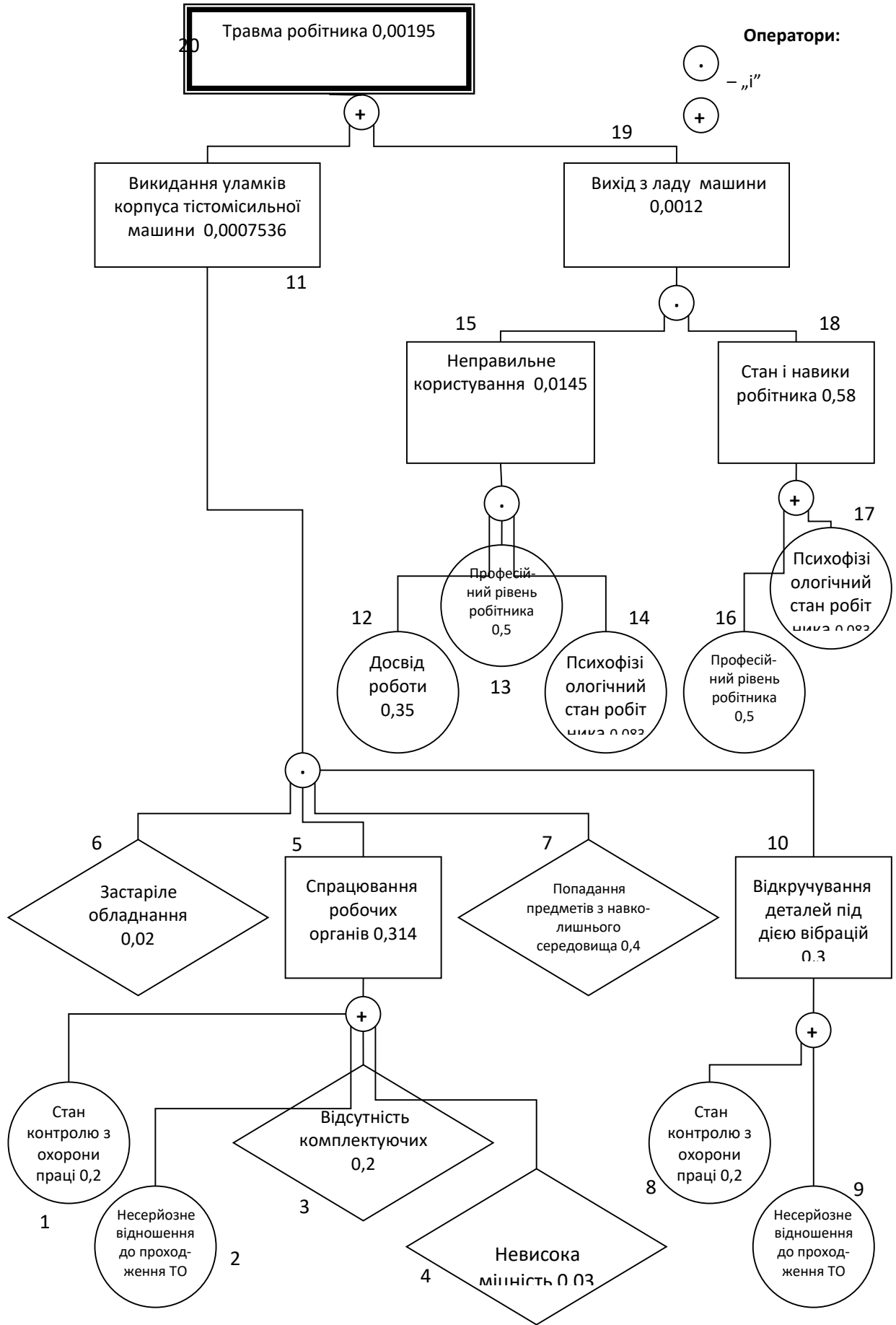


Рис. 5.3 - Логіко-імітаційна модель процесу формування та виникнення аварії та травми під час виробництва.

Ймовірність травми рівна ймовірності виникнення аварії. Це пов'язано з тим, що остання можлива лише за умови контролю людиною роботи дробарки.

Логіко-імітаційні моделі аварій і травм допомагають зменшити ймовірність виникнення аварійних та травмонебезпечних ситуацій. Якщо необхідно оцінити рівень небезпеки будь-якого робочого місця, слід уважно вивчити і побудувати логічні моделі можливих небезпечних ситуацій, які охоплюють як стан обладнання і самого робочого місця, так і поведінку працюючого і обчислити ймовірність виникнення травми.

Після аналізу результатів моделювання ймовірність виникнення травми можна звести до дуже малої величини – достатньо зменшити вплив ймовірностей вихідних факторів, які до неї призводять.

#### **5.4 Розробка заходів щодо захисту населення**

Захист населення базується на державній системі заходів, що забезпечують виконання організаційних, інженерно - технічних, санітарно - гігієнічних та інших заходів в сфері запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

До надзвичайних ситуацій природного характеру, які можуть виникнути на території підприємства належить: пожежа, ураган, смерч, землетрус, великі опади дощів.

З метою захисту населення, зменшення втрат та шкоди економіці в разі виникнення надзвичайних ситуацій має проводитись спеціальний комплекс заходів, а саме:

- оповіщення та інформування населення про надзвичайну ситуацію, яка може виникнути;
- спостереження і контроль за довкіллям , продуктами харчування і водою;
- створення захисних споруд та укриття в них усього населення

відповідно до приналежності (працююча зміна, населення, яке проживає в небезпечній зоні);

– проведення медичного захисту для зменшення ступеня ураження людей, своєчасне надання допомоги та лікування.

## 6. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Економічні розрахунки орієнтовано на оцінку впливу технічних характеристик нових систем зерносушіння на прибуток, який може бути одержано при її впровадженні. У загальному випадку, прибуток, що очікується від впровадження нової техніки в технології, визначається за формулою:

$$\Pi = [(I_1 + 0,15K_1) - (I_2 + 0,15K_2)]V, \quad (6.1)$$

де  $I_1$  - витрати в базовій теплотехнології;  $K_1$  - капітальні вкладення в виробничі фонди базової технології;  $I_2$  і  $K_2$  - відповідно, витрати і капітальні вкладення в модернізованій технології;  $V$  - річний обсяг виробництва.

Для аналізу економічної ефективності розробленого обладнання було проведено порівняння економічних характеристик НВЧ+ІЧ сушарки з існуючими сушарками У13-СП-25, ДСП-25, Сапфир-2083.

Загальні експлуатаційні витрати розраховуються як:

$$И = ЗП + Н_{зп} + A_0 + P_{то} + C_э + C_{гсм}, \quad (6.2)$$

де  $ЗП$  – Заробітна плата обслуговуючого персоналу,  $Н_{зп}$  – Нарахування на заробітну плату;  $A_0$  – амортизаційні відрахування;  $P_{то}$  – витрати на ремонт технічне обслуговування;  $C_э$  – вартість споживаної електроенергії;  $C_{гсм}$  – вартість умовного палива.

Заробітна плата обслуговуючого персоналу.

Передбачається, що сушарка зерна обслуговується одним машиністом, який повинен працювати по 4-м розрядом механізованих робіт, і одним працівником - по 3-му розряду ручних робіт. Таким чином, погодинна оплата праці відповідно до тарифної сітки з урахуванням преміальних (об'ємом 40%), відпускних (8,3%) і нарахувань на фонд заробітної плати (22%) складе для машиніста 23,99 грн; працівника - 18,87 грн. Тому витрати на оплату праці (з нарахуваннями) за роботу на цих агрегатах складуть 42,9 грн. за 1 чол-годину.

Амортизаційні відрахування визначаються в% від балансової вартості

обладнання.

$$A_o = \frac{K \times H_a}{100}, \quad (6.3)$$

де  $H_a$  – коефіцієнт витрат на амортизацію, дорівнює 15%.  $K$  – вартість сушарки, грн.

Таблиця 6.1 - Вартість експериментальної установки:

Назва	Кількість	Вартість	Сума
Магнетрон	3	440	1320
ІЧ випромінювач	3	800	2400
Корпус	1	1000	1000
Двигун	1	1290	1290
			6010

Витрати на поточний ремонт визначаються в% від балансової вартості аналогічно витратам на амортизацію:

$$P_{то} = \frac{K \times H_p}{100}, \quad (5.4)$$

де  $H_p$  – коефіцієнт витрат на ремонт, дорівнює 60%

Вартість електроенергії:

$$C_e = O_e \times (T_e + T_n), \quad (6.5)$$

де  $O_e$  – обсяг споживаної електроенергії, кВт,  $T_e$  – роздрібний тариф на електроенергію,  $T_n$  – тариф на послуги постачальників універсальних послуг.

Обсяг споживаної електроенергії залежить від потужності випромінювачів та вентиляторів.

$$O_e = N_{НВЧ} + N_{ІЧ} + N_{вент} \quad (6.6)$$

де:  $N_{НВЧ}$  – потужність випромінювачів НВЧ поля,  $N_{ІЧ}$  – потужність ІЧ випромінювачів,  $N_{вент}$  – потужність вентиляторів.

Вартість умовного палива  $C_{гсм}$  становить 9,72 грн (з ПДВ) за 1 м<sup>3</sup>. Крім цього, тариф на транспортування газу розподільними трубопроводами

становить 616,4 грн (з ПДВ) за 1000 м<sup>3</sup>. Комбінована НВЧ+ІЧ сушарка не споживає палива, а для традиційних конвективних сушарок потреба природного газу при зменшенні вологи на 1% з 1 т зерна складе 1,5 м<sup>3</sup>. За даними витрати на паливо складуть за 1 годину сушіння зерна на ДСП-25 - 1,65 тис.грн; на «Сапфір-2083» - 1,1 тис. грн.

Собівартість сушіння зерна розраховано як відношення загальних експлуатаційних витрат за годину до продуктивності сушарки і відсотку зменшення вологості.

Економія розраховувалась як різниця між середньою вартістю сушіння зерна на елеваторі та собівартістю сушіння зерна в сушарці. Термін окупності визначено як відношення економії за рік до вартості сушарки. Результати розрахунків наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 6.2 - Ефективність застосування сушарок продовольчого і насінневого зерна

Показники	Значення			
	У13-СШ-25	ДСП-25	Сапфір-2083	НВЧ+ІЧ
Вартість сушарки, грн. (К)	3596400	2960000	2570000	6000
Годинна продуктивність для продовольчого зерна, т / год	25	25	24	0,05
Годинна продуктивність для кукурудзи, т / год ( )	21			0,016
Годинна продуктивність для соняшника, т / год	12			0,01
Денна продуктивність продовольчого зерна, т (Q)	350	350	336	0,14
Витрати на електроенергію за 1 год., грн.	79	101,9	94,1	2,91
Витрати на паливо за 1 годину, грн	1467	1650	1100	0
амортизаційні відрахування грн/год.	685	235	203,6	1,14
Загальні витрати за годину, грн	2231	1986,9	1397,7	4,05
Тривалість робочого дня, год	14	14	14	14
Кількість днів роботи всього	90	90	90	90
собівартість сушіння зерна грн./т.%	17,2	15,78	13,76	13,5

середня вартість сушіння 1 т /% зерна	50	50	50	50
Економія грн. за 1т.	32,79	34,42	37,96	36,5
Кількість зерна для сушіння за рік, тис. т	31,5	31,5	30,2	0,063
Економія за рік тис. грн..	1032,99	1084,251	1146,4046	2,3
Термін окупності	3,48	2,73	2,24	2,61

Видно, що за економічними показниками нова НВЧ+ІЧ сушарка не відрізняється від існуючих традиційних аналогів. Розроблена сушарка має невелику продуктивність, але вона дозволяє забезпечити м'які режими сушіння без травмування зерна і збереження екологічної чистоти продукту. До того ж, враховуючи її невеликі габарити, потрібна продуктивність може бути досягнута паралельним встановленням декількох модулів. Перераховані вище фактори дозволяють рекомендувати розроблену сушарку для сушіння насіннєвого зерна.

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

На підставі теоретичних та експериментальних досліджень в роботі науково обґрунтовано та доведено що комбіноване використання мікрохвильового та інфрачервоного випромінювання в сушарці дозволяє зменшити енергетичні витрати на процес сушіння рослинної сировини при збереженні її якості за рахунок того, що під впливом мікрохвильового випромінювання, що діє на вологу в середині продукту, вона інтенсивно переноситься до поверхні, звідки видаляється дією інфрачервоного випромінювання.

Результати проведених досліджень дозволили сформулювати основні висновки:

1. Синтез математичної моделі сушильної установки з комбінованим мікрохвильовим та інфрачервоним підведенням енергії проведено на основі аналізу існуючих методів математичного моделювання процесу сушіння під дією мікрохвильового та інфрачервоного випромінювання. Розглянута параметрична та фізична модель процесу волого вилучення із плоского шару сипучої сировини. За допомогою  $\pi$ -теорему отримано загальний вид рівняння, що описує залежність коефіцієнта масовіддачі від тонкого зернового шару, який обробляється інфрачервоним та мікрохвильовим випромінювачем, до повітря від режимних та конструктивних параметрів установки.

2. Для рішення завдань експериментального моделювання процесу сушіння сировини електромагнітним полем, на базі стрічкової сушарки із використанням ІЧ та НВЧ джерел підводу енергії розроблено програму експериментальних досліджень, що включає проведення експериментів при сушінні насіння із нагрівом ІЧ та НВЧ випромінюванням у рухомому шарі сипучої сировини в широкому діапазоні змін питомої потужності випромінювачів, навантаження на стрічку та швидкості стрічки.

3. В результаті випробувань процесу вилучення вологи в рухомому шарі насіння визначено кінетику сушіння соняшника кукурудзи та сої під дією



ІЧ та НВЧ випромінювання та встановлено, що вплив потужності випромінювачів та швидкості руху стрічки на швидкість і час сушіння мають нелінійний характер і ступінь цієї нелінійності неоднакова для різних культур, тому для кожної з культур потрібно визначати свої коефіцієнти критеріального рівняння для визначення максимальної швидкості сушіння. Експериментально доведено, що при швидкостях стрічки більших за 0,018 м/с температура продукту за час сушіння не досягає гранично допустимої на всьому діапазоні зміни питомої потужності випромінювачів. Для швидкості стрічки 0,007 м/с при питомій потужності НВЧ випромінювача 15 кВт/м<sup>2</sup> температура насіння соняшнику перевищила 65 °С.

4. Узагальнення експериментальних даних сушіння кукурудзи, соняшнику та сої показало, що в напівлогарифмічних координатах криві швидкості сушіння мають лінійний характер, що дозволяє для їх опису використати лінійне диференційне рівняння інтегруванням якого отримано рівняння для визначення часу сушіння. Максимальна швидкість сушіння, що потрібна для визначення часу сушіння знаходиться з використанням коефіцієнту масовіддачі, що отримано з критеріального рівняння, коефіцієнти якого визначено в результаті обробки експериментальних кривих сушіння кожного продукту. Максимальна похибка розрахунків за критеріальним рівнянням не перевищує 15%.

5. Дослідний зразок сушарки дозволяє витратити 2,55 МДж/кг.вид.вол. при сушінні сої, 2,96 МДж/кг.вид.вол. при сушінні соняшника і 3,44 МДж/кг.вид.вол. при сушінні кукурудзи. Питомі витрати енергії при сушінні продукту в мікрохвильовому полі надвисокої частоти є меншими за аналогічні витрати при сушінні продукту під дією ІЧ випромінювання і ця різниця зменшується зі зростанням питомої потужності випромінювання, що може бути пояснено існуванням «механодифузійного ефекту» при сушінні в НВЧ полі. Мінімальні показники питомого енергоспоживання досягаються при комбінованому НВЧ+ІЧ енергопідведенні. За економічними показниками НВЧ+ІЧ сушарка не відрізняється від існуючих традиційних аналогів, але

дозволяє забезпечити м'які режими сушіння без травмування зерна і збереження екологічної чистоти продукту. Термін окупності установки складає 2,61 року.

### Список використаних джерел

1. Бандура, В. М.; Паламарчук, В. І. Експериментальні дослідження кінетики сушіння ріпаку та сої в нерухомому шарі в інфрачервоному полі. Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій], 2012, 41 (2): 110-113
2. Бандура, В. М. Оптимізація процесу сушіння насіння ріпаку в інфрачервоному полі. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки, 2012, 11 (2): 343-346
3. Бандура В.М. Перспективи и застосування інфрачервоного та мікрохвильового поля в процесі переробки олійних культур. – Вінниця: журнал Техніка. Енергія. Транспорт АПК. №3 том 95, 94-101с 2016
4. Бандура В.М., Маренченко О.І., Пилипенко Є.О. Кінетика сушіння насіння соняшника та сої з використанням електромагнітних джерел енергії. Вінниця: журнал Техніка. Енергія. Транспорт. АПК. №2 том 98, 63-68с 2017
5. Бурдо О.Г., Зиков О.В., Гайда С. Нові принципи термообробки зерна. // Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій / Міністерство освіти і науки України. – Одеса: 1999. - Вип.. 20. - С. 223-229
6. Камінський В.Д., Бабич М.Б. Переробка та зберігання сільськогосподарської продукції. Навчальний посібник для вузів. Одеса: Аспект, 2000. 460 с.
7. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.І. Сушіння зерна: Підручник. К.: Либідь, 1997.-352с
8. «Сушильні процеси та установки», Ткаченко С.Й., Співак О.Ю., Вінниця ВНТУ 2008р. 87с.
9. «Деякі проблеми експериментального моделювання процесів сушіння рослинної сировини в мікрохвильовому електромагнітному полі» / І. Яровий, О. В. Катасонов // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. 2015. Вип. 47(2). С. 227-231.
10. Нездвєцька І. В. Експериментальні дослідження параметрів

процесу сушіння цикорію кореневого / І. В. Нездвецька // Вісник ЖНАЕУ. 2015. № 1 (47), т. 1. С. 245–250.

11. Гайда С. Прогнозування удосконалення існуючих і розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості. // Наук. праці ОДАХТ, Одеса. 1997. Вип.17. С.162-167.

12. Поперечний, А. М.; Жданов, І. В.; Шульга, А. В. Сушіння насіння соняшнику у віброкиплячому шарі при радіаційному теплопідведенні. Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій], 2012, 41 (1): 201-206.

13. Поперечний, А.М. Сушіння харчової сировини у псевдорозрідженому шарі: монографія / А.М. Поперечний, Н.М. Варваріна, І.В. Жданов. Донецьк: ДонНУЕТ, 2012р. 303 с.

14. Паламарчук, В. І. Сушіння сої в стрічковій інфрачервоній установці / В. І. Паламарчук, В. М. Бандура // Зб. тез доп. 75-ої наук. конф. викл. акад., Одеса, 20-24 квіт. 2015 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій; під заг. ред. Б.В. Єгорова. Одеса, 2015. С. 197-199.

15. Машини та обладнання переробних виробництв: навч. посібник для студ. вузів / О.В. Дацишин [та ін.]; за ред. О.В. Дацишина. – К.: Вища освіта, 2005. – 159 с.

16. Механізація переробної галузі агропромислового комплексу: Навч. посібник/ О.В. Гвоздєв, Ф.Ю. Ялпачик, Ю.П. Рогач, М.М. Сердюк. – К.: Вища освіта. 2006. – 479 с.

17. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості / І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлов та ін. За ред. академіка УААН Гулого І.С. – Вінниця : Нова книга, 2001 – 576 с.

18. Bonazzi, C., Dumoulin, E., Raoult-Wack, A.L., Berk, Z., Bimbenet, J.J., Courtois, F., Trystram, G., Vasseur, J., 1996, Food drying and dewatering, Drying Technology, 14(9), pp 2135-2170.

19. Abukhalifeh, H.; Dhib, R.; Fayed, M.E. Model predictive control of an infrared- convective dryer. Drying Technology 2005, 23(3), 497–511.

20. Togrul, H. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering* 2005, 71(3), 311–323.
21. Hashimoto, A.; Kameoka, T. Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials. *Drying Technology* 1999, 17(7–8), 1613–1626.
22. Swasdisevi, T.; Devahastin, S.; Sa-Adchom, P.; Soponronnarit, S. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *Journal of Food Engineering* 2009, 92(1), 100–106.
23. Arsoy, S. Temperature-controlled infrared drying characteristics of soils. *Drying Technology* 2008, 26(12), 1477–1483.
24. Pawar, S.B.; Thorat, B.N. Infrared drying of alumina-silicate mineral cake. *Drying Technology* 2011, 29(7), 819–824.
25. Doymaz, I. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices. *Journal of Food Science and Technology* 2012, 49(6), 760–766.
26. Nasiroglu, S.; Kocabiyik, H. Thin-layer infrared radiation drying of red pepper slices. *Journal of Food Process Engineering* 2009, 32(1), 1–16.
27. Jezek, D.; Tripalo, B.; Brncic, M.; Karlovic, D.; Brncic, S.R.; Vikić-Topic, D.; Karlovic, S. Dehydration of celery by infrared drying. *Croatica Chemica Acta* 2008, 81(2), 325–331.