

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Криворізький національний університет
Навчально-науковий інститут економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

ДОПУСКАЮ ДО ЗАХИСТУ
Гарант освітньої програми
«Обладнання переробних і харчових
виробництв»

_____ Цвіркун Л.О.
«___» _____ 2026 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на здобуття ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
за освітньою програмою «Обладнання переробних і харчових виробництв»

на тему: **«УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ КОНВЕЄРНОЇ СУШАРКИ»**

Виконав:

здобувач вищої освіти _____ Богдан Артемій Владиславович _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник:

_____ ст. викладач, к.т.н., Гончаренко В.А. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Кривий Ріг
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Криворізький національний університет
Навчально-науковий інститут економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

Форма здобуття вищої освіти денна

Ступінь бакалавр

Галузь знань Механічна інженерія

Освітня програма Обладнання переробних і харчових виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант освітньої програми «Обладнання
переробних і харчових виробництв»

Цвіркун Л.О.

« » 2026 року

З А В Д А Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Богдану Артемію Владиславовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів конвеєрної сушарки»

Керівник роботи к.т.н., ст. викл., Гончаренко В.А.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Затверджено: наказом ректора Криворізького національного університету від «31» грудня 2025 р. № 85-с.

2. Строк подання здобувачем ВО роботи « 12 » червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Технічна документація до устаткування.

2. Монографії, наукові статті, автореферати дисертацій, тези доповідей на наукові конференції.

3. Навчальна і методична література, інформація мережі Інтернет.

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Вступ.

2. Аналіз обладнання для сушіння харчової сировини.

3. Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів конвеєрної сушарки.

4. Аналіз результатів досліджень.

- 5. Висновки.
- 6. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень):

Оптимізована конструкція багатострічкової сушарки з комбінованим інфрачервоним підведенням теплоти.
Функціональні зони багатострічкової сушарки.

6. Дата видачі завдання «02» січня 2026 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	05.01.2026-15.02.2026
2	Аналіз обладнання для сушіння харчової сировини	16.02.2026-10.03.2026
3	Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів конвеєрної сушарки	11.03.2026-15.04.2026
4	Аналіз результатів досліджень	16.04.2026-30.04.2026
5	Висновки по роботі	01.05.2026-12.05.2026
6	Оформлення роботи і подання до захисту	16.05.2026-12.06.2026

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Богдан А.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Гончаренко В.А.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура бакалаврської роботи. Повний обсяг бакалаврської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 47 сторінки. Робота містить 11 рисунків, 2 таблиці. Список використаних джерел складається з 35 найменувань.

Об'єкт роботи – багатострічкова конвеєрна сушарка.

Предмет роботи – процес сушіння.

Мета роботи – удосконалення конструкційно-технологічних параметрів конвеєрної сушарки.

У роботі зазначено, що однією з найважливіших властивостей у будь-якому процесі сушіння харчових продуктів є зниження активності води в продуктах до конкретного визначеного рівня, оскільки це покращує стабільність продукту та мінімізує фізичні зміни, що відбуваються під час зберігання.

Запропоновано конструкцію багатострічкової сушарки з комбінованим інфрачервоним підведенням теплоти. Велика перевага ІЧ-нагрівання полягає в тому, що його можна застосовувати безперервно або періодично для економії енергії та покращення якості продукції. Оптимізовано підсистеми комбінованої конвеєрної сушарки:

Підсистема завантажування та розподілу сировини. Повітряний потік через шар продукту повинен бути рівномірним, щоб забезпечити однорідний вміст вологи в продукті. Тому доцільно встановити розподільники для забезпечення рівномірного розподілу продукту скребкового типу.

Механічна підсистема. Беручи до уваги принцип конвекції, доцільно застосовувати осьові вентилятори для забезпечення ефекту конвекції в сушарці, тобто циркуляції повітря всередині камери сушіння, оскільки потік повітря, що виходить є радіальним, а разом із конструкцією камери сушіння це забезпечить ефект конвекції в камері сушіння.

Транспортна підсистема. Оскільки в сушарці використовується кілька рівнів стрічок, важливо здійснювати контроль за станом механізмів. Тому доцільне обрати такі датчики для контролю конвеєра:

- датчики швидкості задля контролю швидкості руху кожної стрічки, що критично для точного дотримання часу перебування продукту в камері сушіння;
- датчики сходження стрічки будуть подавати сигнал про зупинку, якщо стрічка змістилася вбік, щоб запобігти її пошкодженню;
- ультразвуковий датчик задля виявлення скупчення сировини на конвеєрній стрічці в місцях пересипання з одного рівня на інший.

Підсистема сушіння. Сушильний конвеєр доцільно розділити на три зони так, щоб у кожній можна було встановити різні умови сушіння. Для підсистеми сушіння вважається за доцільне обрати такі датчики:

- датчики температури вимірюватимуть температуру повітря в кожній зоні сушіння, що забезпечить запобігання пересушення сировини;
- датчики вологості будуть встановлені на вході та на виході сушильного обладнання, а також між стрічками.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: конвеєрна сушарка, конвективне та інфрачервоне сушіння, датчики контролю, багатострічкова конвеєрна сушарка.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ	7
1.1 Обладнання для сушіння сировини	7
1.2 Конвеєрні та тунельні сушарки безперервної дії	12
1.3 Транспортний механізм конвеєрної сушарки	17
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНВЕЄРНОЇ СУШАРКИ	22
2.1 Тепломасоперенос у процесі сушіння	22
2.2 Оптимізована конструкція стрічкової сушарки з комбінованим інфрачервоним підведенням теплоти	25
2.3 Підсистеми комбінованої конвеєрної сушарки	28
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	39
3.1 Вплив висоти шару продукту на сушіння	39
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	48

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Богдан			Удосконалення конструкційно- технологічних параметрів конвеєрної сушарки		Літ.	Арк.
Перевір.		Гончаренко						
							5	1
Н. Контр.		Омельченко					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	
Затверд.		Цвіркун						

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що однією з найважливіших властивостей у будь-якому процесі сушіння харчових продуктів є зниження активності води в продуктах до конкретного визначеного рівня, оскільки це покращує стабільність продукту та мінімізує хімічні та фізичні зміни, що відбуваються під час зберігання.

Мета та задачі дослідження. Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів конвеєрної сушарки.

Практична та наукова новизна. Запропоновано конструкцію багатострічкової сушарки з комбінованим інфрачервоним підведенням теплоти. Велика перевага ІЧ-нагрівання полягає в тому, що його можна застосовувати безперервно або періодично для економії енергії та покращення якості продукції. Оптимізовано підсистеми комбінованої конвеєрної сушарки:

Підсистема завантажування та розподілу сировини. Повітряний потік через шар продукту повинен бути рівномірним, щоб забезпечити однорідний вміст вологи в продукті. Тому доцільно встановити розподільники для забезпечення рівномірного розподілу продукту скребкового типу. Завдяки формі скребка сировина розміщатиметься тонким і рівномірним шаром.

Механічна підсистема. Беручи до уваги принцип конвекції, доцільно застосовувати осьові вентилятори для забезпечення ефекту конвекції в сушарці, тобто циркуляції повітря всередині камери сушіння, оскільки потік повітря, що виходить є радіальним, а разом із конструкцією камери сушіння це забезпечить ефект конвекції в камері сушіння.

Транспортна підсистема. Оскільки в багатострічковій сушарці використовується кілька рівнів стрічок, важливо здійснювати контроль за станом механізмів. Тому доцільне обрати такі датчики для контролю конвеєра:

- датчики швидкості (енкодери) задля контролю швидкості руху кожної стрічки, що критично для точного дотримання часу перебування продукту в камері сушіння;

- датчики сходження стрічки будуть подавати сигнал про зупинку, якщо стрічка змістилася вбік, щоб запобігти її пошкодженню;

- ультразвуковий датчик задля виявлення скупчення сировини на конвеєрній стрічці в місцях пересипання з одного рівня на інший.

Підсистема сушіння. Сушильний конвеєр доцільно розділити на три зони так, щоб у кожній можна було встановити різні умови сушіння. Для підсистеми сушіння вважається за доцільне обрати такі датчики:

- датчики температури вимірюватимуть температуру повітря в кожній зоні сушіння, що забезпечить запобігання пересушення сировини;

- датчики вологості будуть встановлені на вході та на виході сушильного обладнання, а також між стрічками.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Богдан			Удосконалення конструкційно- технологічних параметрів конвеєрної сушарки				Літ.	Арк.	Аркуші		
Перевір.		Гончаренко									6	1	
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.		Омельченко											
Затверд.		Цвіркун											

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

1.1 Обладнання для сушіння сировини

Всі види продуктів харчування потребують, так чи інакше, збереження, головним чином для того, щоб скоротити або зупинити псування, щоб забезпечити їх доступність протягом певного періоду часу, щоб зберегти харчові властивості якнайдовше або щоб отримати продукти з доданою вартістю. Серед цих причин, псування є основною причиною використання методів зберігання або консервування [1, 18]. На даний момент існує багато видів сушарок на промисловому рівні, які використовують технології видалення вологи за допомогою тепла, ліофілізації та осмосу але мета сушіння залишається однією і тією ж – запобігти росту бактерій та розвитку мікроорганізмів у продукті для подальшого його споживання. Основною метою процесу дегідратації є зменшення вмісту вологи в продукті до рівнів, що обмежують ріст мікробів та хімічні реакції. Існує велика кількість сушарок, які використовують інші типи енергії, форми та способи роботи. Класифікація цих сушарок дуже широка і залежить від фізичних умов подачі, масштабу виробництва, вартості експлуатації та спеціальних аспектів.

Мета сушіння продуктів харчування полягає в запобіганні росту мікробів і хімічного псування шляхом видалення активності води, тим самим подовжуючи термін придатності продуктів, а також для полегшення зберігання, пакування та транспортування [23]. Усі продукти харчування можуть псуватися харчовими мікроорганізмами або через ферментативні реакції всередині самих продуктів. Для росту бактерій, дріжджів і плісняви та для виклику псування потрібна достатня кількість вологи. Зменшуючи вологість продуктів харчування, запобігають росту цих мікроорганізмів, що викликають псування, та сповільнюють ферментативні реакції, що відбуваються всередині продуктів. Усі ці процеси допомагають запобігти псуванню сировини.

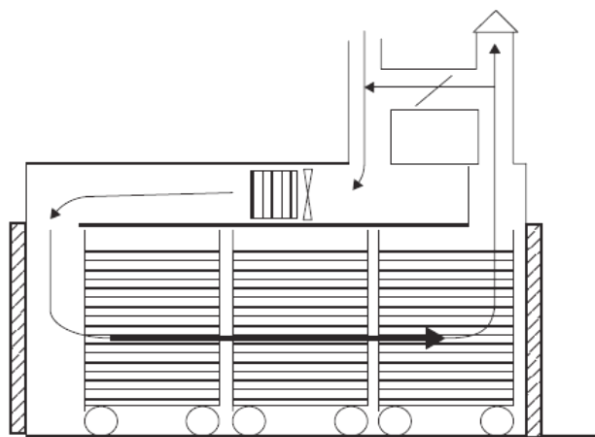
Процес сушіння зерна відповідає двом найбільш загальним групам до яких його можна віднести: природне та штучне сушіння. Природне сушіння – це техніка, яка використовує сонячні промені для зменшення відсотка вологості зерна, що надходить з процесу ферментації, приблизно 60% вологості від загальної ваги зерна. Після завершення сушіння зерно має залишатися з вологістю між 8 та 15%, оскільки якщо вона зменшиться ще більше це вплине на крихкість зерна, роблячи його більш ламким [5]. Штучне сушіння охоплює методи, які використовують машини, що генерують тепло і передають його зернам зазвичай через теплопровідність або конвекцію, а рідше – через випромінювання. Залежно від конкретного принципу передачі тепла з

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Богдан			Удосконалення конструкційно- технологічних параметрів конвеєрної сушарки	Літ.	Арк.
Перевір.		Гончаренко					Аркушів
							7
							15
Н. Контр.		Омельченко				ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	
Затверд.		Цвіркун					

використанням точної системи контролю температури під час процесу сушіння підтримується стабільна температура в межах від 50 до 80°C, щоб не вплинути на хімічні та органолептичні властивості продукту. Завдяки цьому штучне сушіння дозволяє значно скоротити час, який необхідний для зниження рівня вологості зерна до оптимального відсотка між 8 і 15% від загальної маси сухої речовини.

Штучне висушування здійснюється шляхом генерації тепла від зовнішнього джерела або обігрівача за допомогою палива, такого як природний газ. У межах штучного висушування існує кілька методів для досягнення бажаного висушування: непрямі сушарки або сушарки шляхом теплопровідності – передають тепло через стінки, що містять твердий матеріал, тобто без прямого контакту з твердим матеріалом, який потрібно висушити; прямі сушарки або сушарки шляхом конвекції – використане гаряче повітря контактує з твердим матеріалом, який потрібно висушити. Розглянемо деякі типи обладнання для сушіння [6, 10]:

Тунельні сушарки є відсіками шаф, які працюють послідовно (рис. 1.1). Тверді речовини розміщуються на лотках, що знаходяться в шафах, і вони безперервно переміщуються тунелем, через який циркулює потік гарячого повітря з низькою вологістю, який зазвичай направляється в протилежному напрямку до руху шаф.



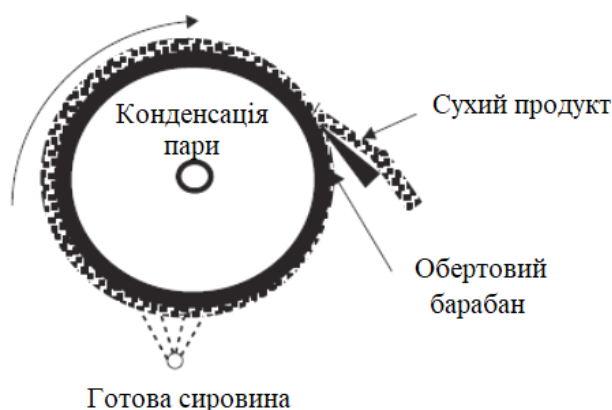
Сушарка складається з кількох послідовних секцій, кожна з яких має вентилятор та нагрівальні спіралі. У цьому типі сушарки продукт просувається тунелем, де розміщений вологий твердий матеріал. Тому, коли новий продукт входить у тунель, з іншого боку виходить сухий продукт.

Рисунок 1.1 – Тунельна сушарка

Обертові сушарки широко використовується в промисловості, де необхідно сушити вологі гранульовані тверді речовини. Вона складається з порожнистого нахилоного циліндра, який обертається навколо своєї осі. Тверді речовини засипаються зверху циліндра і повільно пересуваються по ньому завдяки нахилу. Обертові сушарки складаються з циліндричної оболонки, яка обертається на підшипниках, трохи нахилених щодо горизонтального рівня. Вологий продукт подається у верхню частину сушарки [10, 16]. Продукт просувається до виходу завдяки обертанню барабана, ефекту насадки та нахилу під яким розташований барабан. Під час їхнього руху гарячий повітряний потік проходить назустріч матеріалу, що сушиться. У деяких випадках нагрівання відбувається за допомогою непрямого контакту через нагріту стінку циліндра.

Ротаційні сушарки видають матеріал, що вивільняється, який повинен бути відносно сипучим і гранульованим. Такий тип сушарки можна використовувати в періодичних та безперервних процесів обробляючи великі обсяги сировини.

Барабанні сушарки підходять для сушіння суспензій або паст з дрібних твердих частинок. Вона складається з металевого барабана, який нагрівається і обертається (рис. 1.2). Під час обертання барабан збирає зволожені тверді частинки, що прилипає до нього, і вони розгладжуються валком. Випаровування відбувається через прямий контакт сировини з барабаном до повного висихання. Застосовується для матеріалу у вигляді пасти, оскільки поверхня ролика нагрівається за допомогою пари, волога речовина прилипає до цієї поверхні, де висихає і зрештою видаляється за допомогою ножів для подальших процесів.



Барабанні сушарки з непрямым контактом найбільш поширеною сушаркою з непрямым контактом є сушарка з паровими трубами. Вона складається з циліндричної обертаної оболонки, зазвичай злегка нахиленої (18° до 58°) до горизонталі для полегшення переміщення вологого продукту через її оболонку.

Рисунок 1.2 – Барабанна сушарка

Кілька труб, що нагріваються парою, розташовані симетрично по периметру. Для полегшення перемішування за трубами зазвичай додають підйомні лопатки [23]. Сушарки з непрямым контактом використовуються тоді, коли сушарки з прямим контактом не підходять для завдання, наприклад, коли прямий контакт з нагрітими газами неприйнятний для якості продукту або можуть бути наявні дрібні частинки, які можуть переноситися потоком сушильного газу. Цей тип сушарки ідеальний для безперервного сушіння твердих речовин, які не можна піддавати впливу звичайних атмосферних або продуктів згоряння газів. У порівнянні з сушарками з прямим контактом, сушарки з непрямым контактом мають кілька переваг, таких як менше руйнування продукту через його інтенсивний вплив високих температур.

Барабанні конічні сушарки мають конічну форму резервуару і зазвичай працюють під вакуумом. Внутрішньо встановлений гвинт надає продукту руху за допомогою агітації. Цей гвинт також може нагріватися, що забезпечує додаткове тепло для продукту. Гвинт обертається навколо власної осі і переміщується по судині на обертівому важелі та також дозволяє самостійну очистку стінок судини при його проходженні. Потрібно враховувати надійні ущільнені підшипники, щоб запобігти забрудненню продукту. Агітовані сушарки функціонують з нагрівальними середовищами гарячою водою, парою

або часто гарячою олією [1-3, 23]. У горизонтальних агітованих сушарках вал, що проходить через центр нерухомого горизонтального циліндричного корпусу, вкритий численними лопатями для агітації для змішування та переміщення продукту, що сушиться. Тепло для сушіння передається циркуляцією через вал або через зовнішню оболонку. Деякі сучасні конструкції також включають стінові скребки, встановлені на пружинах для кращого оброблення липких продуктів. Для партійної сушарки вихідний отвір може розташовуватися в центрі, а для безперервної сушарки вихідний отвір може бути розташований у кінці сушарки. Вивантаження, як і подача, відбувається за допомогою гвинтового конвеєра, обертового клапана або подвійного шиберного клапана.

Ротаційні сушарки можна класифікувати як прямі, непрямо-прямі, непрямі та спеціальні типи. Класифікація базується на способі передачі тепла твердим речовинам, прямий – коли нагріте повітря контактує з твердими речовинами, а непрямий – коли воно відокремлене металевою стінкою або трубою. Сушарки прямого нагріву є найпростішими та найбільш економічними. Вони завжди переважні у випадках, коли контакт між твердими речовинами та газами або повітрям не є шкідливим [23]. Якщо ж тверді речовини містять надзвичайно дрібні частинки, можливі надмірні втрати через захоплення в потоці вихідного газу через великі об'єми газу та високі швидкості газу, які потрібні. Для сушарок непрямого нагріву потрібен лише достатній потік газу через циліндр для видалення пари. Вони мають перевагу, оскільки підходять для процесів, які потребують спеціальної газової атмосфери та виключення впливу зовнішнього повітря.

Сушарки з псевдозрідженим шаром – обладнання за допомогою якого твердий матеріал псевдозріджується. Частинки розташовані на пластині повітряного розподільника, яка рівномірно розподіляє потік повітря по шару, забезпечуючи рівномірне висихання (рис. 1.2). Типові компоненти, що зустрічаються в сушарці з псевдозрідженим шаром, включають повітряний вентилятор, підігрівач повітря та колонку шару [6, 10, 16, 22]. За допомогою цього процесу частинки вологого твердого матеріалу піднімаються, здійснюючи інші процеси всередині сушарки зменшуючи вологість твердого матеріалу, щоб зрештою перейти через камеру, де він псевдозріджується холодним газом для охолодження сухого продукту. Сушарки з псевдозрідженим шаром працюють за принципом повітря, яке проштовхується через продукт, що знаходиться на розподільній пластині для повітря. Псевдозріджувальне повітря проходить через продукт і при певній швидкості повітря продукт стає псевдозрідженим – це відбувається тоді, коли вага продукту повністю підтримується повітряним потоком.

Основними перевагами сушарок з псевдозрідженим шаром є висока тепловіддача та високий коефіцієнт переносу тепла і маси, що забезпечує короткий час сушіння. Перевагами цих сушарок з псевдозрідженим шаром також є легкість експлуатації та обслуговування, бо можна легко автоматизувати. Типовими недоліками сушарок з псевдозрідженим шаром є великі перепади тиску над шаром продукту, зношування твердих частинок і ерозія поверхонь, що містять продукт. Повністю псевдозріджена сушарка має

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

основний недолік – нерівномірний розподіл часу перебування в сушарці. Обладнання має низку переваг, які бажані у багатьох процесах, таких як хороше змішування твердих речовин, легке транспортування матеріалу та високі показники тепломасообміну, а процес сушіння є безперервним. До переваг належать висока теплова ефективність, високий рівень видалення вологи та низькі витрати на обслуговування. Недоліки включають великий перепад тиску та високе споживання електроенергії.

Великі контактні поверхні сушарки є ще однією перевагою сушарок з псевдозрідженим шаром, оскільки вони скорочують час сушіння продукту. Крім усіх переваг завдяки отриманню продукту схожому на рідину ці сушарки можуть використовувати гравітацію для транспортування продукту всередину та назовні сушарки за допомогою пневматичного транспортування. Небажаною характеристикою псевдозрідженого шару є низька якість флуїдизації, що призводить до зниження продуктивності та ефективності роботи. Неправильне сушіння може спричинити ріст цвілі та поставити під загрозу безпечне зберігання продукту. Надто високі температури можуть спричинити погіршення якості зерна через підвищене інактивацію ферментів.

Розпилювальні сушарки за допомогою рідини перетворюють сировину на висушений продукт. Рідина зазвичай розпилюється у рухоме середовище гарячого повітря. Вода в краплях випаровується утворюючи сухий продукт. Енергія, яка поглинається внаслідок випаровування води підтримує низьку температуру крапель, тому можна застосовувати високу температуру повітря. Розпилювальне сушіння можна використовувати для сушіння насичених суспензій дрібних твердих частинок [16]. Час сушіння цього процесу дуже короткий у порівнянні з альтернативними методами сушіння, а технологію сушіння можна використовувати для термочутливих продуктів. Розпилювальне сушіння використовується для сушіння харчових продуктів, таких як молочні продукти. Розпилювальне сушіння використовується як безперервний процес сушіння. Перевагами цього методу є ефективний контроль властивостей та якості, високі обсяги виробництва з відносно простим обладнанням. Недоліками цієї системи є те, що її не можна використовувати для продуктів з високою насипною густиною.

Сонячне сушіння – збір сонячної енергії для сушіння продукту. Сонячні сушарки можна поділити на чотири основні типи: прямі, непрямі, змішаного режиму та гібридні сушарки. Сонячні сушарки можна використовувати для сушіння з безперервним потоком матеріалу за допомогою плоских колекторів для забезпечення необхідної енергії [1, 16]. Сонячні сушарки високої температури використовуються, коли потрібні відносно високі швидкості сушіння – це сушіння може здійснюватися як партіями так і безперервним потоком. Головна перевага сонячного сушіння включає використання безкоштовного та відновлюваного джерела енергії. Недоліки включають відсутність цього ресурсу, а методи зберігання можуть використовуватися для накопичення енергії на періоди низької радіації.

8. Сублісаційне сушіння є дуже корисним методом при сушінні твердих речовин, які не можна нагрівати навіть до помірних температур. Продукт, який

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

потрібно висушити, заморожується. Вода всередині продукту видаляється сублімацією з замерзлого матеріалу в вакуумній камері. Ліофілізація дає продукт найвищої якості, яку можна отримати будь-яким методом сушіння. Під час ліофілізації продукт набуває структурної жорсткості на поверхні, де відбувається сублімація. Також при використанні ліофілізації втрата смаку та аромату мінімальна. У будь-якому харчовому продукті під час ліофілізації буде присутня зв'язана вода, але часто існує різка перехідна температура для ще вологого шару під час сушіння, нижче якої якість продукту значно підвищується [7, 23]. Ліофілізація вимагає дуже низького тиску або високого вакууму, щоб досягти прийнятної швидкості сушіння. По суті, ліофілізація є багатоступеневою операцією, під час якої матеріал, що підлягає стабілізації, сильно заморожується шляхом охолодження до низьких температур, сушиться прямою сублімацією замороженого розчинника всередині продукту та десорбцією зв'язаного розчинника, а потім зберігається в контрольованих умовах у сухому стані. Якщо процес ліофілізації виконаний правильно, більшість продуктів можна зберігати таким чином протягом необмеженого часу і при цьому вони зберігають всі свої фізичні, хімічні, біологічні та більшість органолептичних властивостей.

1.2 Конвеєрні та тунельні сушарки безперервної дії

Сушіння зазвичай описується як видалення вологи для отримання твердого продукту за допомогою теплової енергії. Однією з найважливіших властивостей у будь-якому процесі сушіння харчових продуктів є зниження активності води в продуктах до конкретного визначеного рівня, оскільки це покращує стабільність продукту та мінімізує хімічні та фізичні зміни, що відбуваються під час зберігання. Конвеєрні сушарки є безперервними сушарками з циркуляцією повітря через матеріал або паралельно з ним, який переміщається по конвеєру з перфорованою стрічкою. Стрічка зазвичай виготовляється з металевої сітки або перфорованого сталевого листа, хоча також буває з пластикової сітки [8, 9, 16]. Вологий продукт завантажується механізованим способом на одному кінці стрічки, шарами товщиною 10–15 см, а конвеєрна стрічка рухається з швидкістю, яка встановлюється відповідно до часу сушіння. У сушарках з конвеєрною стрічкою теплообмін відбувається конвекцією між продуктом і нагрітим потоком повітря. Енергія, яка необхідна для випаровування вологи з продукту подається на відкриту поверхню матеріалу за допомогою конвекції, після чого випарована волога відноситься рухом повітря. Основні характеристики конвеєрної сушарки [11]:

- продукт повинен бути добре подрібнений, щоб забезпечити відповідний повітряний потік через шар продукту.
- досягаються високі швидкості сушіння
- обладнання призначене для середніх та великих обсягів продукту і досягаються значення відносної вологості між 10 та 15%. Часто продукт зазнає явища усадки, утворення кірки та деформації. Іншою недоліком також є висока вартість експлуатації таких сушарок, через втрати під час завантаження,

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

розвантаження та ручної роботи, що можна було б зменшити попередньою обробкою продукту.

Таке обладнання також називають стрічково-тунельними – це безперервні сушарки з циркуляцією повітря через матеріал, який переміщається по транспортеру зі щільною стрічкою. Транспортёр рухається з установленою швидкістю, залежно від часу сушіння. Зазвичай це переплетена металева сітка або перфорована сталевая пластина. Вологий продукт автоматично завантажувється на один кінець стрічки, шарами товщиною 10–15 см [11, 12]. У першій секції обладнання повітря для сушіння проходить перпендикулярно через шар продукту у висхідному напрямку, тоді як у ділянках поблизу завантажувального кінця воно циркулює у низхідному напрямку з метою уникнення захоплення дрібних частинок майже сухого продукту. Сушильний конвеєр можна розділити на дві або навіть три окремі секції так, щоб у кожній можна було встановити різні умови сушіння. Конструкція сушарки як двох окремих тунелів дозволяє рівномірно змішувати частково сухий продукт наприкінці першого тунелю та повторно завантажувати його в шар більшої глибини для проходження через другий тунель із меншою швидкістю стрічки, що сприяє отриманню продуктів вищої якості та забезпечує економію площі стрічки у останній секції.

Нагрівання повітря зазвичай здійснюється за допомогою пари, яка конденсується всередині пучка труб, через які зовні проходить сушильне повітря. Залежно від кількості та форми транспортерних стрічок існують різні типи обладнання [9, 11]:

- сушарки з однією стрічкою;
- сушарки з кількома стрічками;
- спіральні сушарки з стрічкою.

Переваги сушарок з багатьма стрічками такі:

- зменшення розмірів апарата;
- вища тепловіддача;
- більша однорідність у якості кінцевого продукту.

Сушарки з однією стрічкою є апаратами з меншою площею сушіння, яка складається з однієї транспортної стрічки, що робить сушарку практичною та простою у використанні. Сушарки з багатосмуговою стрічкою є апаратами з більшою площею сушіння, які складаються зі збору однієї довшої транспортної стрічки таким чином, щоб продукт циркулював всередині сушильного обладнання, оскільки існують деякі продукти, яким потрібен триваліший час у сушарці [9, 11]. Спіральні сушарки з стрічкою є апаратами з великою площею сушіння. На сьогодні сушарки з стрічкою поступово замінюють тунельні при сушінні фруктів та овочів. Тунельні сушарки з стрічкою призначені головним чином для масового сушіння одного продукту. Пристрої мають низьку універсальність, тобто вони не підходять для процесів, у яких необхідно часто змінювати сировину і, відповідно, умови сушіння.

Принцип роботи однопрохідної, одноетапної сушарки конвеєрного типу представлено на рисунку 1.3. Продукт потрапляє на перфорований конвеєр по

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

якому сировина транспортується через камеру сушіння. Гаряче повітря пропускається через шар продукту, щоб вода випаровувалася із сировини, а пара відводилася від продукту. У конвеєрних сушарках керованою змінною зазвичай є температура гарячого повітря. Додаткові змінні включають товщину шару та час перебування. Багатопрохідна сушарка дуже схожа на однопрохідну багатоступеневу сушарку але у багатопрохідній сушарці конвеєрні стрічки розташовані одна над одною (рис. 1.4).

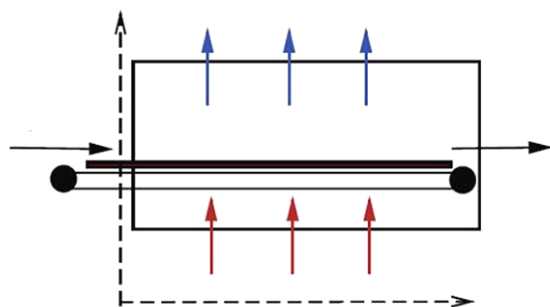


Рисунок 1.3 – Однопрохідна конвеєрна сушарка

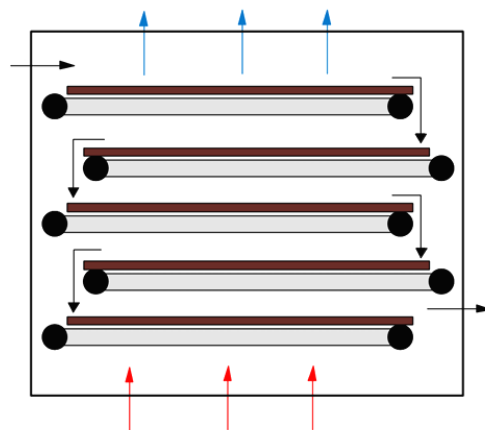


Рисунок 1.4 – Багатопрохідна конвеєрна сушарка

Перевага багатопрохідної сушарки полягає у зменшенні займаної площі підлоги для тієї ж потужності. Крім того, включають таку ж можливість регулювання глибини ліжка, як у випадку однопрохідної багатоступеневої конфігурації [16, 17]. Продукт потрапляє у сушарку зверху, а потім рухається вниз до нижніх стрічок – це найпопулярніша конфігурація, яку знаходять у промисловості. Цей тип машини має недолік у тому, що її не можна встановити справжнім температурним профілем але оскільки вона має низку конвеєрів один над одним сушіння може бути в кілька разів довшим, ніж у еквівалентної одноступеневої машини. Підходить для продуктів, які потребують ніжного сушіння протягом тривалого перебування.

Однопрохідна, одноетапна сушарка – це найпростіша конвеєрна сушарка безперервної дії. Продукт подається на конвеєрну стрічку, яка потім транспортує продукт поки гаряче повітря пропускається через шар продукту. Шар продукту, повітряний потік і температура залишаються постійними по всій камері. Однопрохідна машина забезпечує наступне [8, 9, 17]:

- продукт проходить через машину лише один раз;
- продукт проходить через машину на одному конвеєрі.

Однопрохідні машини мають перевагу в тому, що їх можна налаштувати з температурним профілем, що відповідає різним фазам, через які проходить матеріал під час обробки. Найпоширеніші типи конвеєрного сушильного обладнання має такі потоки:

– вакуумний потік – варіації принципу сушарки з одним конвеєром але при використанні значно вищого тиску повітря та швидкості через конвеєр з високим опором, мають переваги в деяких застосуваннях;

– ламінарний потік в основному використовується для сушіння термочутливої сировини. Повільніша альтернатива сушінню, що підходить для певних застосувань.

Однопрохідна, багатоступенева сушарка має дві або більше однопрохідних сушарок розташовані послідовно, що забезпечує можливість змінювати глибину шару між камерами (рис. 1.5). Продукт поступово можна ущільнювати з наростаючою глибиною, коли зменшується вологість. Температуру кожного етапу можна змінювати для оптимізації ефективності кожного етапу.

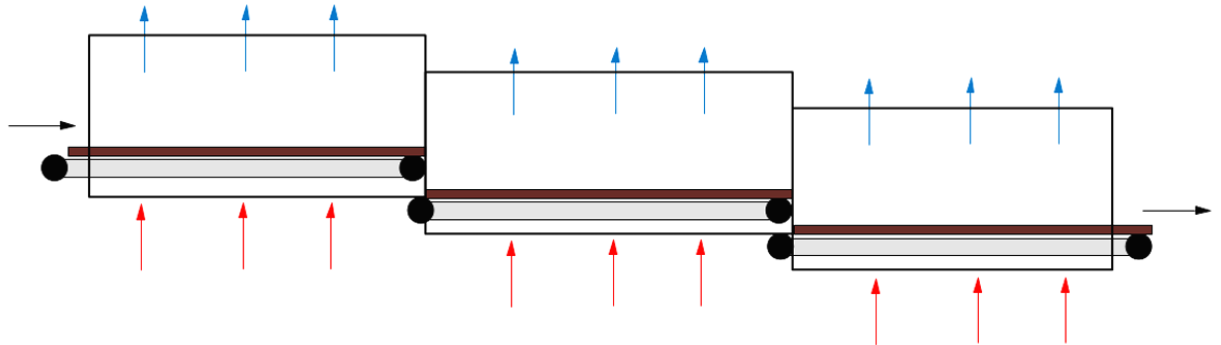


Рисунок 1.5 – Однопрохідна багатоступенева сушарка

У сушарці повітря пропускається через сушильний шар зі швидкістю від 0,4 до 1,4 м/с. Сучасні сушарки використовують частково рециркульоване повітря, що робиться для зменшення кількості енергії необхідної для роботи сушарки. Повітря буде видалятися, щоб підтримувати заздалегідь визначений рівень вологості в сушарці [16]. Використовуючи цей стан конструкція може ефективніше використовувати енергію, що постачається повітрям. Додається лише необхідна кількість свіжого повітря, щоб підтримувати вологість рециркулюючого повітря на бажаному рівні. Типовий обсяг видаленого повітря становить 20%, але може варіюватися в межах від 10 до 40% від загального потоку підігрітого повітря.

Сушіння на конвеєрі використовує перфоровану стрічку для передачі подачі матеріалів через сушарку. Нагріте повітря або проходить під і крізь або через стрічку та поверхню продукту після чого його знову нагрівають і циркулюють. Крім того, кожна зона може використовувати різний температурний профіль і контроль. Насичене або майже насичене повітря викидається з сушарки через центральний витяжний канал.

Коли необхідно спроектувати сушарку то потрібно знати механізм і кінетику сушіння відповідного матеріалу, тобто слід встановити кількісні залежності (графічні або аналітичні) між часом, який повинна тривати операція, та умовами сушіння. Змінні, які визначають час сушіння матеріалу або продукту, такі:

– повітряні: температура, масова швидкість, вологість, характеристики потоку (напрямок) тощо.

– продукту: вологість, розмір, форма, структура тощо.

Розглянемо декілька видів обладнання:

Сушарка тунельного типу з прямим нагріванням ідеально підходять для продуктів, які потребують високих температур. Вони оснащені стрічковими пальниками та повітряним потоком змінної швидкості для досягнення точного контролю температури та вологості, а також з багатозональним контролем та незалежним верхнім і нижнім нагрівом. Частина пальників розташована безпосередньо над продуктом, інша – під стрічкою. Завдяки більшій кількості пальників можливо точніше налаштувати теплову криву відповідно до технічних вимог і таким чином підтримувати стабільну якість продукції. Пальники прямого нагріву використовують вентилятор повітря, розташований поблизу обігрівача [12]. Потім повітря розподіляється центральною трубою до камери сушіння та до кожного нагрівача. Оскільки згоряння відбувається у тунелі, необхідна система примусової тяги, яка гарантуватиме безпечне видалення продуктів згоряння. У порівнянні з конвекційними стрічковими сушарками, сушарка прямого нагріву дозволяє розмішувати її в приміщеннях з меншою висотою та шириною.

Сушарка тунельна з непрямым нагріванням використовує вентилятори змінної частоти обертання та великого обсягу для циркуляції гарячого повітря через канали розташовані зверху і знизу конвеєрної стрічки, забезпечуючи постійне радіаційне тепло для продуктів. Багатозональне, незалежне верхнє та нижнє нагрівання та точний контроль температури та вологості допомагають максимально підвищити якість та однорідність продукту [9, 12]. Електрична тунельна сушарка є ідеальною альтернативою, коли доступ до природного газу або пропану не є легко доступним. Електричні сушарки оснащені довговічними елементами та регулюють тепло за допомогою точного контролера. Вони легкі в експлуатації та обслуговуванні, а також не потребують вентиляції.

Сушарка тунельна з вентиляторами циркуляції великого об'єму та змінної швидкості, які подають гаряче повітря до зон продукту через регульовані верхні та нижні повітророзподільні канали. Завдяки своїй передовій системі нагрівання рециркульованого повітря вона забезпечує енергоефективність, різко знижуючи експлуатаційні витрати та викиди. Гарячий повітряний потік з теплообмінника надходить до продукту не лише зверху, а й знизу по стрічці прямо в камеру сушіння [12]. Швидкість верхнього та нижнього потоків можна регулювати за допомогою регулюючих заслінок. Після того як гаряче повітря нагріває продукт, завдяки системі воно прямує до нагрівачів, де повторно нагрівається, щоб знову надходити до продукту. Гаряче повітря відокремлене від полум'я пальників за допомогою теплообмінника. Таким чином, уникнено забруднення газами, що утворюються при горінні та завдяки циркуляції його можна повторно використовувати для нагріву сировини.

Сушарка тунельна з випромінюючою трубою. Обладнання є надзвичайно ефективними у застосуваннях з високотемпературною парою, часто як складова гібридної сушарки. Вони подають тепло непрямо або напівнепрямо за допомогою горілок з випромінюючою трубою, водночас вводячи пару через нержавіючі сталеві щупи, які розташовані над конвеєрною стрічкою. Інфрачервона тунельна сушарка підходить для продуктів, які потребують сушіння за допомогою випромінюваного тепла в статичному

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повітрі [8, 9, 12]. Вона нагріває масло до необхідної температури та циркулює його через труби, що оточують камеру сушарки, що створює м'яке випромінюване тепло, яке рівномірно розподілене по ширині сушарки без турбулентного руху повітря. Інфрачервона тунельна сушарка широко застосовується завдяки постачанню безперервного інфрачервоного тепла через середовище з проникною поверхнею. Застосовується для різноманітних харчових продуктів і особливо ефективна для поверхневого сушіння.

1.3 Транспортний механізм конвеєрної сушарки

Конвеєрний транспортер – це система безперервного транспортування, що складається в основному з суцільної стрічки, яка рухається між двома барабанами. Стрічка приводиться в рух тертям одним із барабанів, який, у свою чергу, приводиться в дію двигуном. Інший барабан зазвичай обертається вільно, без будь-якого приводу і його функція полягає в забезпеченні повернення стрічки. Стрічка підтримується роликami між двома барабанами. Завдяки руху стрічки матеріал, що на ній розміщений транспортується до барабана і підлягає сушінню [24, 28]. Конвеєрні стрічки відіграють основну роль у підвищенні ефективності та оптимізації процесів у харчовій промисловості, бо вони є ключовим компонентом для подолання та вирішення проблем, притаманних системам завантаження та розвантаження у цій критично важливій галузі.

По-перше, конвеєрні стрічки пропонують надзвичайно адаптивне та гнучке рішення для постійного переміщення продуктів і сировини на різних етапах виробничого процесу. Безперервний характер їх руху усуває потребу у постійному ручному втручанні, тим самим знижуючи час простою і підвищуючи продуктивність у ланцюзі поставок. Ця автоматизація сприяє мінімізації ризиків, пов'язаних із ручним обробленням, забезпечуючи якість і безпеку транспортованих харчових продуктів.

По-друге, варіативність у розмірі та ширині конвеєрних стрічок дозволяє їх налаштування відповідно до конкретних потреб кожної операції. Універсальність є необхідною для адаптації обладнання до різних типів харчових продуктів від найменших до найбільших.

Системи конвеєрних стрічок використовуються, коли матеріали потрібно переміщувати у відносно великих кількостях між визначеними позиціями на фіксованому маршруті. Більшість цих систем приводяться в рух механічно, а деякі використовують гравітацію для переміщення сировини між точками різної висоти. Системи мають і поділяють наступні характеристики [29]:

- зазвичай вони механізовані, а іноді автоматизовані;
- займають фіксовані позиції, встановлюючи маршрути;
- майже завжди обмежені одностороннім потоком матеріалів;
- можуть використовуватися тільки для транспортування або для транспортування разом з автоматичним зберіганням елементів.

Транспортери можна класифікувати на дві великі групи:

- ковзання по плоскому ролику;

– ковзання по суцільній плоскій поверхні.

Кочення по плоскому ролику використовується для транспортування вантажів або деталей зазвичай великої ваги, коли використання безперервних жолобів призвело б до великого тертя стрічки об них через вагу транспортуваного матеріалу. У цьому типі транспортування існують групи роликів, які називаються станціями. Відстань між станціями залежить від кількості транспортуваного матеріалу та його характеристик, а також від нахилу конвеєра і ширини стрічки. Зазвичай відстань між станціями становить від 1 000 до 1 750 мм [29]. Ковзання по суцільній плоскій поверхні застосовується для транспортування готових виробів, одиничних продуктів тощо, завдяки великій стабільності, яку забезпечує цей тип ковзання. Перевага ремня, що спирається на ковзне ложе, полягає насамперед у тому, що перевезені товари мають більшу стабільність на стрічці. Правильно підібравши стрічку та матеріал ліжка ковзання, можна сприятливо впливати на коефіцієнт тертя, шум при ковзанні та термін служби стрічки. Тертя між ковзним ложе та стрічкою значною мірою залежить від типу матеріалу стрічки та поверхні ліжка ковзання, а також впливає вологість, пил, можливі забруднення тощо.

Конвеєрні стрічки виготовлені з міцних та довговічних матеріалів, таких як гума, нейлон і поліестер, забезпечують надійну роботу та тривалий термін служби. Матеріали здатні витримувати несприятливі умови, такі як екстремальні температури, вологість та вплив хімічних речовин присутніх у харчовій промисловості. Вкрай важливо забезпечити довговічність і міцність компонентів, що використовуються у виробничому процесі, щоб підтримувати цілісність системи та уникати непередбачуваних простоїв [8, 9, 28]. Конвеєрні стрічки в харчовій промисловості є набагато більше, ніж просто рухливі стрічки – це технічне та стратегічне рішення, яке безпосередньо сприяє вирішенню та подоланню проблем у системах розвантаження та завантаження. У харчовій промисловості використовуються різні типи конвеєрних стрічок для ефективної та безпечної обробки і переміщення продуктів харчування. Розглянемо деякі звичайні типи конвеєрних стрічок, що використовуються в цьому секторі:

Стрічки з металевої сітки. У системі транспортування харчових продуктів вибір матеріалів для конвеєрних стрічок з металевої сітки ґрунтується на кількох ключових аспектах, що включає міркування щодо загальної міцності стрічки, вимог гігієни, які можуть вимагати використання сіток з алюмінію, нержавіючої сталі або вуглецевої сталі, а також потрібної гнучкості для адаптації до різних умов експлуатації. Металеві сітчасті стрічки застосовуються в середовищах із екстремальними температурами, таких як транспортування випечених продуктів харчування, хлібобулочних виробів та закусок, а також транспортування заморожених продуктів, де вони піддаються впливу низьких температур.

Модульні пластикові стрічки виготовлені з пластикових модулів, які з'єднані між собою. Їхня універсальність дозволяє адаптувати їх для широкого спектра застосувань у харчовій промисловості, включаючи транспортування по кривих або підйом продуктів. Вони широко використовуються у харчовій промисловості, особливо у виробництві та обробці таких продуктів, як

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хлібобулочні вироби, м'ясо, фрукти та овочі, завдяки легкості очищення та стійкості до корозії [28]. Гумові стрічки з штовхачами оснащені вбудованими штовхачами, які полегшують переміщення продуктів уздовж стрічки. Вони часто використовуються в транспортних системах з нахилом або в ситуаціях, де потрібно розділяти продукти. Їх застосування є звичайним у випадках, що потребують додаткового захоплення для транспортування нахилених предметів або продуктів, схильних до ковзання. Вони широко використовуються в сільському господарстві для обробки пакунків та при транспортуванні насипних матеріалів.

Силіконові стрічки виготовлені з силікону – матеріалу, який є непористим і здатний витримувати високі температури. Вони використовуються, коли потрібна стійкість до екстремальних температур або коли харчові продукти піддаються нагріванню під час обробки. Стрічки з поліестру покриті тефлоном застосовуються для транспортування продуктів харчування, які мають тенденцію до прилипання або жирності, оскільки це запобігає їх прилипання до стрічки [9, 28]. Вони використовуються коли вимагають високої стійкості як до високих температур, так і до контакту з корозійно-агресивними речовинами. Їх часто можна зустріти в хімічній, паперовій, текстильній промисловості та в процесах промислового приготування сировини. Антистатичні стрічки – це стрічки були розроблені з метою зменшення накопичення статичної електрики, явища, яке потенційно може бути шкідливим у середовищах, де обробляють легкозаймисті або чутливі до статичної електрики продукти.

Конвеєрна стрічка – це транспортна система, що складається зі стрічки, яка постійно рухається між двома барабанами (ведучим і хвостовим). Стрічку тягне тертя одного з двох барабанів, який приводиться в рух мотором. Нижній барабан обертається вільно і служить для повернення стрічки. Між двома барабанами стрічка підтримується роликами. Валики є одним з основних компонентів конвеєрної стрічки і від їхньої якості в значній мірі залежить правильне функціонування конвеєра [29]. Якщо їхнє обертання неякісне, крім збільшення тертя і, відповідно, споживання енергії, також відбувається зношування покриттів стрічки, що призводить до скорочення її терміну служби. Якщо валики зупиняються то тертя стрічки об них утворює плоскі ділянки на циліндричній поверхні, що з часом може спричинити їх поломку. Одним з найважливіших компонентів валиків, який найбільше впливає на їхню роботу, є підшипники. Циліндричні ролики, покриті гумою, підходять для витримування невеликих ударів. Циліндричні ролики з гумовими кільцями, якщо вони встановлені на опорних роликах, можуть витримувати великі удари, використовуються в зоні завантаження. Якщо вони встановлені в зоні повернення, вони повинні бути придатні для полегшення очищення стрічки.

Привідна група конвеєрної стрічки є одним із найважливіших її компонентів. Від правильного вибору елементів, що її складають, залежить безпека експлуатації та термін служби стрічки. Спосіб запуску впливає на термін служби та поведінку компонентів привідної групи, а також на термін служби стрічки, барабанів і роликів. Це також впливає на поведінку стрічки на

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вертикальних кривих, хід натяжних барабанів та на втрату тертя на ведучому барабані [24, 29]. Електричний двигун – це електрична машина, яка перетворює електричну енергію на механічну енергію за допомогою електромагнітних взаємодій. Більшість електричних двигунів є зворотними, тобто вони можуть перетворювати механічну енергію на електричну працюючи як генератори. Двигуни змінного струму та двигуни постійного струму засновані на одному й тому ж принципі роботи, який встановлює, що якщо провідник, через який протікає електричний струм знаходиться в дії магнітного поля і має тенденцію переміщуватися перпендикулярно до ліній дії магнітного поля. Провідник має тенденцію працювати як електромагніт через електричний струм, що протікає по ньому, набуваючи таким чином магнітних властивостей, що спричиняють, через взаємодію з полюсами, розташованими в статорі, круговий рух, який спостерігається в роторі двигуна. Продукт взаємодії магнітних полів змушує провідник прагнути до переміщення, виробляючи таким чином механічну енергію. Енергія передається назовні за допомогою пристрою, який називається вал. Згідно з природою перетвореного електричного струму, електричні двигуни класифікуються на двигуни постійного струму, також званого прямим, двигуни змінного струму, які, у свою чергу, групуються, залежно від їхньої системи роботи, на індукційні двигуни, синхронні двигуни та двигуни з колектором. Як ті, так і інші мають усі елементи, спільні для електромагнітних обертових машин.

Ротор – це компонент, який обертається у електричній машині, будь то мотор або електричний генератор. Ротор складається з вала, який підтримує комплект обмоток, намотаних на магнітне серце, яке може обертатися всередині магнітного поля, створеного або магнітом, або проходженням через інший комплект обмоток, намотаних на полярні частини, які залишаються нерухомими і які складають те, що називають статором постійного або змінного струму, залежно від типу машини, про яку йдеться. Статор – це нерухома частина обертального механізму, яка вміщує ротор. У електричних двигунах статор складається з природного магніту (у малих двигунах постійного струму) або з однієї чи кількох котушок, встановлених на металевому осерді, які створюють магнітне поле у потужніших двигунах змінного струму їх також називають індукторами [24, 28, 29]. Пускачі об'єднують елементи, необхідні для керування та захисту електродвигунів. Від їх вибору залежить ефективність усієї роботи: рівень захисту, робота на постійній або змінній швидкості тощо. Пускач гарантує наступні функції: відключення, захист від короткого замикання та перевантаження, перемикач. Вимикачі – це механічний пристрій з'єднання, який здатний встановлювати, витримувати та переривати струми в колі за нормальних умов, включаючи вказані умови перевантаження під час експлуатації та витримувати протягом певного часу струми в колі за зазначених аномальних умов.

Сервомотор (сервопривід) – це спеціальний тип двигуна з особливими характеристиками керування положенням. Коли говорять про сервомотор, мають на увазі систему, що складається з електромеханічних та електронних компонентів. Двигун всередині сервомотора – це звичайний постійний двигун.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вал двигуна з'єднується з редуктором подібним до трансмісії, що робиться для збільшення крутного моменту двигуна та для можливості утримувати фіксоване положення, коли це потрібно. Електронна схема відповідає за керування рухом та положенням двигуна. Присутність системи шестерень, робить так, що при обертанні валу двигуна відчувається інерція значно більша, ніж у звичайного двигуна. Сервомотор – це не просто двигун, а набір частин (включно з двигуном), що утворюють систему.

На основі вище зазначеного можна вважати, що однією з найважливіших властивостей у будь-якому процесі сушіння харчових продуктів є зниження активності води в продуктах до конкретного визначеного рівня, оскільки це покращує стабільність продукту та мінімізує хімічні та фізичні зміни, що відбуваються під час зберігання. При зневодненні вода видаляється із сировини за допомогою сушарок гарячим повітрям, наприклад, шафових, тунельних, конвеєрних та з псевдозрідженим шаром або за допомогою сушарок з нагрітими поверхнями, наприклад, барабанних та вакуумних сушарок. Коли вода на поверхні продукту випаровується її замінює вода, що мігрує зсередини продукту. Цей рух води всередині продукту здійснюється за допомогою декількох механізмів масопереносу. Загальний вміст води та активність води в продукті зменшуються. Процес сушіння не лише зневоднює продукт але й зменшує його вагу та об'єм, що знижує витрати на пакування та транспортування. Зневоднення також має значний вплив на сенсорні властивості продуктів харчування і певні зневоднені продукти відновлюються водою перед споживанням.

Аналіз наукових джерел дав змогу визначити, що конвеєрні сушарки є безперервними сушарками з циркуляцією повітря через матеріал або паралельно з ним, який переміщається по конвеєру з перфорованою стрічкою. У сушарках з конвеєрною стрічкою теплообмін відбувається конвекцією між продуктом і нагрітим потоком повітря. Енергія, яка необхідна для випаровування вологи з продукту подається на відкриту поверхню матеріалу за допомогою конвекції після чого випарована волога відноситься рухом повітря.

Зазначено, що сушарки з однією стрічкою є обладнанням з меншою площею сушіння, яка складається з однієї транспортної стрічки, що робить сушарку практичною та простою у використанні. Однострічкові сушарки – це найпростіша конвеєрна сушарка безперервної дії, де продукт подається на конвеєрну стрічку, яка потім транспортує його поки гаряче повітря пропускається через шар продукту. Шар продукту, повітряний потік і температура залишаються постійними по всій камері. Багатострічкові сушарки містять низку стрічок, щоб продукт циркулював всередині сушильного обладнання, оскільки існують деякі продукти, яким потрібен триваліший час у сушарці. Продукт потрапляє у сушарку зверху, а потім рухається вниз до нижніх стрічок – це найпопулярніша конфігурація, яку знаходять у промисловості. Підходить для продуктів, які потребують ніжного сушіння протягом тривалого перебування.

Основним обладнання конвеєрних сушарок є конвеєрний транспортер – це система безперервного транспортування, що складається в основному з суцільної стрічки, яка рухається між двома барабанами.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНВЕЄРНОЇ СУШАРКИ

2.1 Тепломасоперенос у процесі сушіння

Сушіння продуктів харчування конвекцією – це процес у якому конвективне середовище нагріває поверхню продукту. Нагрівання призводить до випаровування води, а надлишкове тепло спричиняє підвищення температури продукту. У результаті всередині продуктів відбуваються теплопровідність та масова дифузія. Сушіння продуктів харчування – це процес, який включає суміщену передачу маси та тепла. Сушіння конвекцією полягає у видаленні внутрішньої вологи з сировини шляхом прямого контакту вологих твердих частинок з гарячим повітрям [4, 5]. Метод отримав свою назву через те, що випаровування внутрішньої рідини, яка підіймається на поверхню та взаємодіє з гарячим повітрям відповідає переносу тепла за допомогою конвекції. Конвекційне сушіння – це процес у якому конвективне середовище (зазвичай повітря) знаходиться у прямому контакті з твердим тілом для сушіння. Передача тепла відбувається у формі тепла, яке забезпечує конвективне середовище для підвищення температури твердого тіла та випаровування вологи з твердого тіла. Значною перевагою цього середовища є те, що в більшій або меншій мірі запобігається появі неприємного смаку у сухих твердих речовинах за рахунок зменшення контакту вологих зерен із джерелом тепла для сушіння.

Процес залежить від зовнішніх умов температури, вологості повітря, площі експозиції та тиску. Існує також теплопровідність всередині тіла, яка виникає через наявність внутрішніх градієнтів температури. Інший механізм, що відбувається, – це перенесення маси внутрішньої води до поверхні тіла. Цей рух води є функцією внутрішньої фізичної природи продукту та його вологості, і він відбувається через [4]:

- капілярний потік через градієнти всмоктуючого тиску капілярів;
- рідинну дифузію через градієнти концентрації;
- дифузію пари, спричинену градієнтами парового тиску;
- в'язкий потік внаслідок градієнтів загального зовнішнього тиску або високих температур.

Після того як вода виходить на поверхню, вона випаровується в повітря. Розуміння цих двох механізмів у продукті, що сушиться та у повітрі або газі для сушіння, а також термофізичних, рівноважних та транспортних властивостей обох систем має життєву важливість для проектування сушарок.

Сушильні машини використовують різні принципи за допомогою яких

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення конструкційно- технологічних параметрів конвеєрної сушарки				Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.	Богдан										
Перевір.	Гончаренко									22	17
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
Н. Контр.	Омельченко										
Затверд.	Цвіркун										

видаляють воду з зерна. Важливою відмінністю між ними є принцип теплопередачі, що використовується. Деякі застосовують теплопровідність для досягнення своєї мети, тоді як інші, використовують гаряче повітря, що видаляє вологу з повітря за допомогою конвекції. Машини, такі як непрямі сушарки та сушарки з роликами досягають зменшення вологості, передаючи тепло зернам через гарячу поверхню, яка, перебуваючи в контакті з цими твердими речовинами, нагріває їх і піднімає до їх зовнішнього шару внутрішню масу води, щоб її випарувати. Теплопередача є першим видом переносу, оскільки вона визначає швидкість з якою відбувається передача енергії, щоб розрахувати розмір необхідного обладнання або покращити вже існуюче. Існують три різні механізми, через які відбувається передача тепла [4, 13-15]:

- провідність, при якій тепло проходить через саму речовину тіла;
- конвекція, при якій тепло передається через відносний рух частин нагрітого тіла;
- радіація – механізм за допомогою якого тепло передається безпосередньо між віддаленими частинами тіла за допомогою електромагнітного випромінювання.

Процес передачі тепла і маси починається, коли середовище сушіння, зазвичай маса гарячого повітря (з попередньо визначеною швидкістю, вологістю та температурою) вступає в контакт з матеріалом, який потрібно висушити. Тепло спочатку передається на поверхню сировини за допомогою конвекції і рухається через нього шляхом теплопровідності. Вода всередині матеріалу, що сушиться (волога), переміщується зсередини до його поверхні, цей транспорт вологи здійснюється головним чином за рахунок дифузії рідини через різницю концентрацій, хоча також присутні й інші механізми переносу. Передача водяної пари з вологої поверхні матеріалу в сушильне середовище здійснюється за рахунок дифузії через різницю тисків [4-6]. Конвекція є передачею тепла між рухомою рідиною та поверхнею, що може здійснюватися, коли через дію сили тяжіння або різниці температур виникає рух рідини, а також за допомогою механічних засобів, таких як насоси або вентилятори, починається рух рідини або газу з яким розпочинається передача тепла – ця форма відома як примусова конвекція. Щоб створити потік гарячого повітря у їхніх камерах, різні машини використовують природну циркуляцію, яка застосовується у малих системах, що не потребують великого повітряного потоку для своєї роботи зі швидкістю повітря між 0,4 та 1 м/с, а інші використовують примусову циркуляцію, необхідну для обробки великих кількостей зерна у якій швидкість повітряного потоку між 0,5-1 м/с.

Конвекція може бути визначена як процес передачі теплоти від гарячішого середовища до холоднішого при якому одним із середовищ є газ або рідина. Кожна рухома рідина містить енергію і цей рух енергії дозволяє теплоту передавати з однієї точки в іншу. Це означає, що коли холодну рідину приводять у контакт із твердим тілом температура якого вища, тверде тіло передасть енергію у вигляді тепла рідині [16]. Рідина, у свою чергу, може передати отримане тепло наступному твердому тілу температура якого нижча за температуру рідини. Рух енергії можна розділити на дві основні категорії, а

саме: примусову або природну конвекцію. Примусова конвекція – це процес, під час якого до рідини додається механічна енергія для створення необхідного руху. Природна конвекція – це процес, під час якого механічна енергія не додається, а рух створюється через різницю щільності, яка, у свою чергу, викликана різницею температур.

Ключовим фактором для оптимального сушіння є точний контроль процесних змінних, таких як температура, тиск у сушильній камері та вологість вологого повітря, що взаємодіє із сировиною. Оскільки сушіння зерен є термодинамічним процесом при якому відбувається передача маси та тепла, далі визначимо основні змінні сушіння [5]:

- вологість у вологій основі – це співвідношення між масою води в твердому тілі та його загальною масою;

- вологість у сухій масі – це відношення між масою води в твердому тілі та сухою масою;

- відносна вологість – це співвідношення між тиском водяної пари, що міститься у вологому повітрі при певній температурі та тиском насичення, тиском водяної пари при якому повітря не здатне утримувати більше пари при цій температурі без конденсації;

- швидкість висихання визначається як втрата вологи вологим матеріалом відносно одиниці часу.

За кривими кінетики сушіння можна отримати уявлення про споживання енергії, механізм міграції вологи, час сушіння та вплив змінних процесу сушіння конвекцією на швидкість сушіння. Виділяють три етапи на кривій сушіння [5, 6]:

- період початкового нагрівання є короткочасним, коли твердий матеріал нагрівається від кімнатної температури до температури сухого термометра при якій умови на поверхні твердого тіла врівноважуються з умовами повітря для сушіння;

- період сушіння з постійною швидкістю – це коли внутрішня вода сировини піднімається капілярно на поверхню вологого твердого тіла. Період постійної швидкості – це період протягом якого видаляється найбільший вміст вологи при цьому її видалення пропорційне часу сушіння. Випарована волога — це вода, яка знаходиться переважно на поверхні матеріалу, якщо вважати, що швидкість з якою вода випаровується, така сама, як швидкість дифузії води до поверхні продукту то тоді ці два явища знаходяться у рівновазі;

- періоди зменшення швидкості – період сушіння зі зменшенням постійної швидкості разом з вологістю після порушення теплового балансу, що підтримує стабільну температуру, якщо не досягнуто рівноважної вологості то швидкість сушіння сповільнюватиметься до досягнення рівноваги. Вміст вологи наприкінці періоду постійної швидкості є критичним вмістом вологи. У цій точці поверхня твердого тіла більше не насичена водою і швидкість сушіння зменшується зі зменшенням вмісту вологи та збільшенням температури, а швидкість сушіння контролюється швидкістю переміщення вологи всередині твердого тіла.

Перенос маси шляхом молекулярної дифузії – це переміщення маси в

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результаті різниці концентрацій у суміші. При перенесенні тепла, перенесення маси може відбуватися як шляхом дифузії так і шляхом конвекції при цьому остання представляє перенесення маси, що виникає в результаті глобального руху рідини, а перша – перенесення через градієнти концентрації. Як і при перенесенні тепла конвективне перенесення маси складається з двох типів: примусова конвекція при якій рух створюється зовнішньою силою та вільна конвекція, ефект плавання при якому глобальний рух розвивається природним чином внаслідок змін щільності, спричинених різницями концентрацій у середовищі.

Сушіння продуктів харчування з точки зору інженерії є складною процедурою, яка може включати одночасний транспорт маси (молекулярна дифузія, капілярний потік, гідродинамічний потік або поверхнева дифузія) та тепла (провідність, конвекційне випромінювання), серед інших явищ. Хоча добре відомо, що під час сушіння може одночасно бути присутній більше ніж один механізм транспорту маси та тепла. Процес сушіння ділиться на два періоди: період постійної швидкості та період зменшення швидкості сушіння. У цьому сенсі вважається, що період сталої швидкості настає, коли видаляється поверхнева волога частинки [4, 13-15]. Період керується зовнішніми умовами, такими як різниця температур між сухим повітрям і вологою поверхнею, площа, відкрита для дії сухого повітря та швидкість потоку повітря, яка визначає значення коефіцієнтів масо- та теплопереносу. Натомість період зменшення швидкості починається, коли поверхня продукту не насичена і швидкість переміщення вологи зсередини до поверхні менша за швидкість випаровування з неї. Передача маси всередині може відбуватися через капілярний потік, а випаровування на інтерфейсі – через теплопровідність. Перший етап характеризується впливом коефіцієнта конвекції та відносної вологості середовища, тоді як другий етап контролюється ефективною дифузією.

2.2 Оптимізована конструкція стрічкової сушарки з комбінованим інфрачервоним підведенням теплоти

Сушіння є одним із найпоширеніших методів збереження продуктів харчування. Одним із найпоширеніших методів є пропускання повітря з високою температурою та низькою вологістю через шар продукту. При цьому вологу в продукті поглинає повітря, що проходить крізь нього, залишаючи продукт більш сухим, а вихідне повітря – трохи холоднішим і більш вологим. Для цього конкретного методу сушіння існує безліч типів сушарок. Однією з них є багатострічкова сушарка, яка складається з деякої кількості поверхів або рівнів. Продукт потрапляє зверху, тобто на верхню конвеєрну стрічку і переміщається, тоді як гаряче сухе повітря безперервно проходить через шари продукту. Процес триває поки продукт не досягне останнього рівня.

Багатострічкова конвеєрна сушарка має недолік у тому, що для неї не можна встановити справжній температурний профіль але оскільки вона має низку конвеєрів один над одним сушіння може бути в кілька разів довшим, ніж у еквівалентної одноступеневої сушарках, а повітряний потік через шар

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продукту може бути нерівномірним. Головним завданням сушіння в харчовій промисловості є зменшення вмісту вологи в харчовому продукті для того, щоб покращити термін зберігання та забезпечити можливість зберігання. Нерівномірний розподіл вологи в продукті не можна уникнути але його можна мінімізувати в межах продукту, що вимагає забезпечити однорідний вміст вологи в продукті, через рівномірних нагрів сировини. Тому доцільно застосовувати комбіновані методи сушіння, а саме поєднання багатострічкової конвеєрної сушарки з комбінованим інфрачервоним підведенням теплоти.

Основна концепція конвеєрної сушарки полягає в тому, що продукт проходить через сушарку на конвеєрах, а гаряче повітря – через продукт на конвеєрі. Існує дуже мало технологій сушіння, які можуть зрівнятися з конвеєрною сушаркою, яка працює з широким спектром продуктів. Хоча це проста концепція, неправильне розуміння процесу теплообміну та масообміну в конвеєрній сушарці неодмінно призведе до поганого поводження з продуктом, втрати енергії та зниження якості продукції [23]. Інфрачервоне сушіння використовує випромінювальне тепло як основне джерело теплопередачі. Велика перевага ІЧ-нагрівання полягає в тому, що його можна застосовувати безперервно або періодично (як у просторі, так і в часі) для економії енергії та покращення якості продукції. Перенесення енергії через простір за допомогою електромагнітних хвиль. Вона базується на передачі випромінюваної енергії для випаровування вологи з продукту [2, 3, 18]. Енергія вибірково поглинається молекулами води, тому під час сушіння продукту потрібна менша кількість енергії. Включає різні джерела електромагнітного випромінювання з довжинами хвиль від сонячного спектра до мікрохвиль. До цієї категорії входить інфрачервоне випромінювання.

Інфрачервоне випромінювання – тип електромагнітного випромінювання, довжина хвилі якого довша, ніж у видимого світла але коротша, ніж у мікрохвиль. Інфрачервоне випромінювання можна класифікувати на три області: близьку, середню та далеку. Оскільки інфрачервоне випромінювання є видом електромагнітного випромінювання, воно має як спектральну так і напрямну залежність. Спектральну залежність інфрачервоного випромінювання потрібно враховувати через те, що енергія, що виходить від випромінювача, складається з різних довжин хвиль і частка випромінювання в кожному діапазоні залежить від ряду факторів, таких як температура випромінювачів та ламп. Феномен випромінювання стає ще складнішим через те, що випромінювання, яке потрапляє на поверхню має не тільки спектральну залежність, але й напрямну залежність. Довжина хвилі, при якій відбувається максимальне випромінювання визначається температурою випромінювача.

Передача електромагнітного випромінювання не потребує середовища для свого поширення. Спектр довжин хвиль залежить від природи та температури джерела тепла. Всі тіла випромінюють радіацію через свій рівень температури, що відоме як «теплова радіація», оскільки генерується тепло. Теплова радіація, що потрапляє на тіло може бути поглинута, а її енергія перетворюється на тепло відображена від поверхні або передана через матеріал. Матеріали можна класифікувати на основі їхньої пропускну здатності, залежно

від фізичного стану тіла на яке падає радіація [18]. Тіло, яке не дає радіації пройти через нього називається «непрозорим», а його пропускання дорівнює нулю. Прикладами цього є більшість твердих тіл. З іншого боку, рідини та деякі тверді тіла, такі як кам'яна сіль або скло, вважаються «прозорими» для радіації. Зазвичай тверді тіла поглинають всю радіацію в дуже тонкому шарі близькому до поверхні. Це є дуже важливим аспектом у моделюванні теплопередачі. Ідеальне тіло, яке поглинає всю падаючу енергію не відбиваючи її і не пропускаючи називається «чорним тілом».

Інфрачервона енергія є найдавнішим джерелом енергії, що використовується для сушіння, якщо враховувати сонячну променеву енергію, що використовується з цією метою. Сушіння за допомогою штучного випромінювання передбачає використання генераторів ІЧ-випромінювання, таких як електричні лампи або металеві чи керамічні панелі, нагріванні електрикою або газом. Основною характеристикою, яка відрізняє ІЧ-сушіння від інших процесів сушіння є те, що для передачі енергії від джерела до продукту, що сушиться не потрібне середовище адже сам продукт поглинає ІЧ-випромінювання. Класифікація генераторів ІЧ-випромінювання (рис. 2.1).

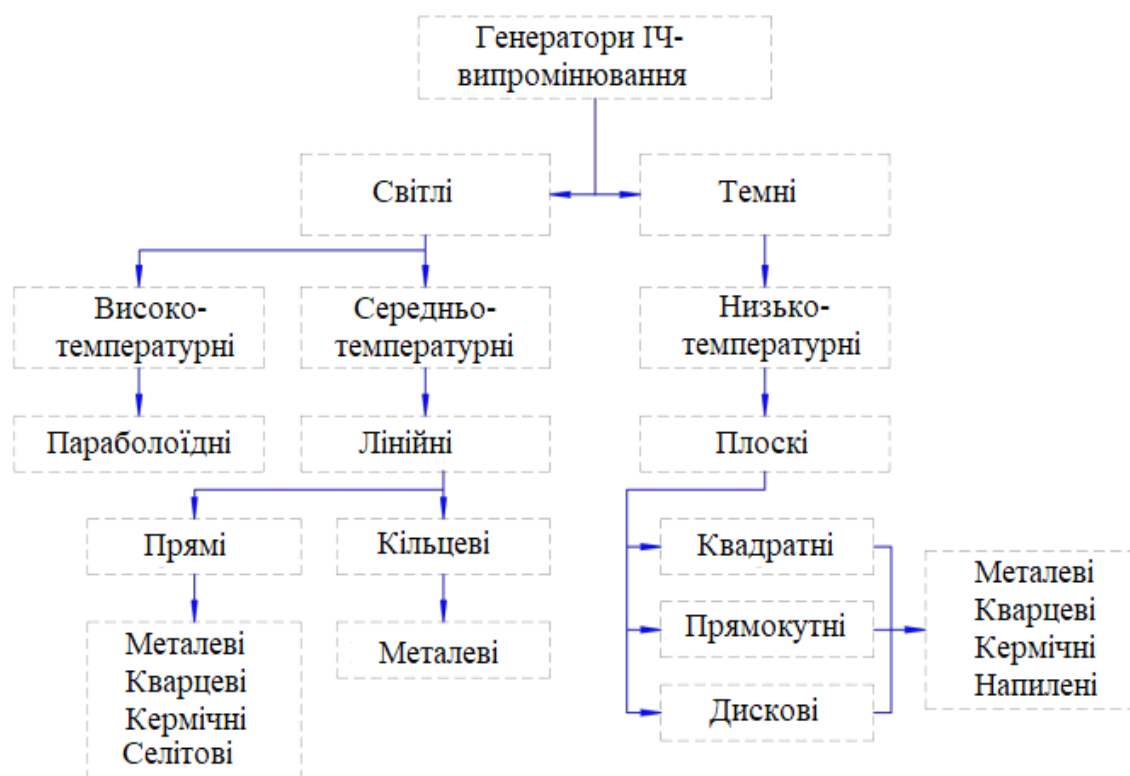


Рисунок 2.1 – Класифікація генераторів ІЧ-випромінювання

Комбіноване застосування електромагнітного випромінювання та конвективного традиційного нагрівання вважається більш ефективним, ніж застосування обох технологій окремо. Можна досягти значної економії енергії, застосовуючи сушку з інфрачервоним супроводом. Цей аспект має надзвичайне значення для харчової промисловості, оскільки можна зменшити витрати, час сушіння та робочі температури. Коли матеріал піддається впливу інфрачервоної

радіації то поверхня матеріалу зазнає впливу, а радіація проникає всередину. Збільшення молекулярної вібрації через поглинання радіації генерує тепло в матеріалі як на поверхні, так і у внутрішніх шарах одночасно [18]. Швидкий нагрів матеріалу збільшує швидкість переміщення вологи до поверхні. Потік конвективного повітря видаляє вологу з поверхні та знижує її температуру, що призводить до більшого теплопереносу. Щодо кінцевої якості отриманих продуктів, існують докази, що параметри, такі як колір, текстура та хімічний склад у продуктах харчування не зазнають значних змін під час сушки з використанням інфрачервоного випромінювання.

Запропоновано оптимізовану конструкцію багатострічкової сушарки з комбінованим інфрачервоним підведенням теплоти (рис. 2.2). Конвеєрна стрічкова сушарка має корпус 5 всередині якого розташовані три стрічкові транспортери 11, дев'ять інфрачервоних випромінювачів, вбудованих у верхню частину кожного транспортера. Волога сировина завантажується транспортером 6 на верхню стрічку, послідовно переміщується з однієї стрічки на іншу згори вниз і виходить з нижньої стрічки зі сторони протилежної місцю завантаження продукту в сушарку. На транспортері встановлений розкладчик 7 скребкового типу, який приводиться в рух автоматично. Для конвективного нагріву передбачено наскрізний потік для системи гарячого повітря 14. Вологе повітря видаляється через витяжні камери 1 за допомогою осьових вентиляторів 3 через повітропроводи 15. Витяжні камери оснащені клапанами 4 для регулювання відведення сушильного агента.

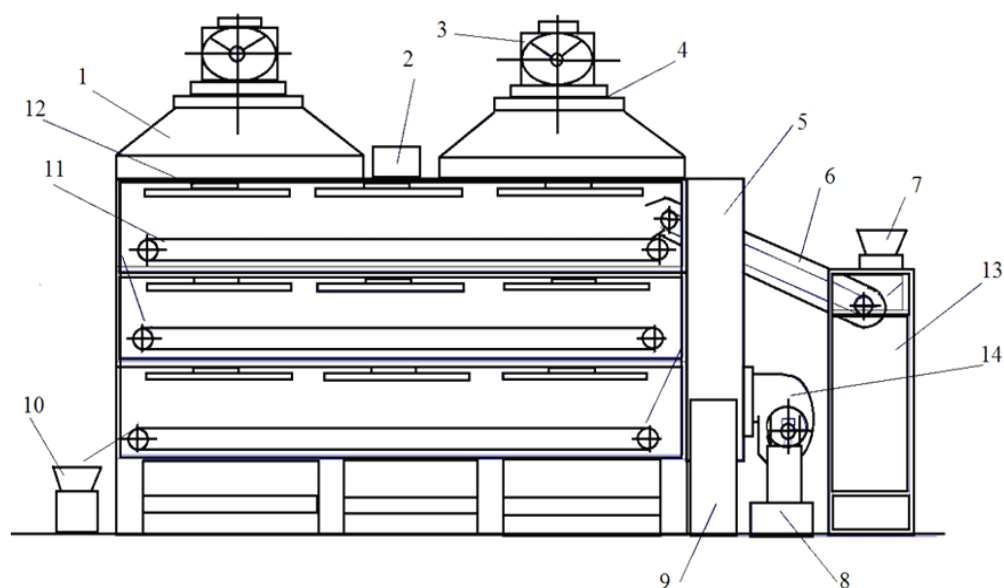


Рисунок 2.2 – Оптимізована конструкція багатострічкової сушарки з комбінованим інфрачервоним підведенням теплоти

2.3 Підсистеми комбінованої конвеєрної сушарки

Підсистема завантажування та розподілу сировини. У процесі конвекційного сушіння одночасно відбуваються два процеси, коли на поверхні продукту є волога, а всередині – внутрішня волога. Відбуваються процеси [16]:

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У першому процесі теплоперенесення, яке забезпечується енергією конвекції відбувається випаровування поверхневої вологи. Водяна пара переноситься від твердого тіла рухомим повітрям. У першому процесі видалення водяної пари залежить від зовнішніх умов, а саме:

- тепло сприяє випаровуванню збільшуючи кількість теплоти в гарячому повітрі, підвищується здатність повітря поглинати поверхневу вологу продукту;
- вологість повітря, коли відносна вологість повітря низька, повітря має більшу здатність поглинати більше водяної пари у повітряний потік;
- потік повітря – це рух повітря, яке переносить водяну пару від продукту, збільшуючи рух повітря, що, у свою чергу, підвищує швидкість видалення водяної пари;
- площа відкритої поверхні забезпечує збільшення площі контакту, що призведе до підвищення швидкості випаровування;
- тиск пари важливий, якщо зовнішній тиск навколишнього середовища зростає то пара буде змушена залишатися в продукті.

У другому процесі внутрішня волога передається зсередини продукту на поверхню, де вона піддається впливу конвекційного тепла, що призводить до випаровування. Під час цього процесу рух вологи від серцевини твердого тіла до поверхні залежить від:

- температури повітря;
- вмісту вологи у повітрі;
- фізичної природи твердого тіла

Коли твердий продукт насичується вологою, поверхня покривається водою. Внутрішня міграція вологи є достатньою, щоб підтримувати цю поверхню твердого продукту з достатньою кількістю вологи, забезпечуючи її покриття. Потік вологи може бути спричинений одним або декількома з наступних механізмів: дифузія, капілярний потік, внутрішній тиск, спричинений усадкою. Швидкість сушіння можна визначити як швидкість з якою волога випаровується з поверхні продукту у повітря. Швидкість сушіння складається з двох періодів: періоду сушіння за сталою швидкістю та періоду сушіння зі зменшенням швидкості. У період сушіння за сталою швидкістю домінує перший процес [16]. Поверхня повністю покрита водою і швидкість сушіння не залежить від внутрішнього вмісту вологи. У міру зменшення вологості продукту другий процес поступово починає домінувати у швидкості сушіння. Саме тоді на поверхні з'являються сухі ділянки і одночасно температура продукту починає підвищуватися через те, що випаровування вологи на поверхні недостатнє для поглинання енергії, що надходить до твердого тіла. Це період сушіння зі зменшенням швидкості. Вологість при якій починається цей другий період, відома як критична вологість.

Повітряний потік через шар продукту повинен бути рівномірним, щоб забезпечити однорідний вміст вологи в продукті. Конвективний тепло- та масообмін пропорційний швидкості повітряного потоку через продукт. Тому повітря буде переважно проходити через менш глибокі ділянки, які пропонують менший опір, ніж глибші ділянки, що призводить до нерівномірного кінцевого вмісту вологи після сушіння. Продукт можна розподіляти різними способами

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

для забезпечення однорідності: коливальні живильники складаються з похилої лоткової конструкції, яка мають коливальний рух [16]. Вібраційні розподільники складаються з вібруючого ремня, що звужується до кінця подачі, що дозволяє продукту потрапляти на ремінь нижче. Якщо злипання продукту не є проблемою, можна використовувати простий бункер з регульованим отвором. Процес розподілу також можна виконувати після того, як продукт розміщено на ремені за допомогою обертових лопатей або зворотно-поступального розподільника скребкового типу, що розподіляє продукт рівномірно по шару. Тому доцільно встановити розподільники для забезпечення рівномірного розподілу продукту скребкового типу. Скребки рівномірно розподілятимуть вологий матеріал по всій ширині стрічки. Завдяки формі скребка сировина розміщатиметься по центру до країв стрічок, що є критичним, оскільки тонкий і рівномірний шар сушитиметься швидше.

Механічна підсистема включає компоненти, що зазвичай відносяться до передачі руху або до підтримки навантажень, які виготовлені з матеріалів, стійких до таких цілей. У конструкції сушарки з конвеєрною стрічкою слід враховувати такі моменти, а саме системи нагрівання та вентиляції [11]:

- нагрівання непряме: паром, гарячою водою, тепловим маслом у сушарці за допомогою внутрішніх теплообмінників;

- нагрівання пряме за допомогою пальників на паливі або природному газі, які направляють полум'я безпосередньо всередину модуля сушарки;

- нагрівання непряме або пряме ззовні: теплообмінники або пальники розміщені зовні, можливо у місці не підпорядкованому обмеженням безпеки.

Вентилятори можна класифікувати на дві групи: осьові та відцентрові. У центробіжному вентиляторі повітряний потік вводиться через колесо, змушуючи його слідувати напрямку осі колеса на вході та перпендикулярно до неї на виході. У свою чергу, центробіжні вентилятори класифікуються за формою лопатей, які можуть бути вигнутими вперед, вигнутими назад або радіальними (прямими) [12]. Лопаті, які зігнуті вперед мають гвинт або колесо з лопатями зігнутими в тому ж напрямку обертання. Вентилятори потребують мало місця, мають низьку периферійну швидкість і є безшумними. Вони використовуються, коли необхідний статичний тиск від низького до середнього, такий, як у системах опалення, кондиціонування повітря або оновлення повітря тощо. Не рекомендується використовувати цей тип вентилятора з запиленним повітрям, оскільки частинки пристають до невеликих зігнутих лопатей і можуть викликати дисбаланс колеса, через що цей тип лопатей відкидається. Лопаті, які вигнуті назад мають колесо з лопатями, які нахилені проти напрямку обертання. Тип вентилятора має найбільшу периферійну швидкість і найвищу продуктивність при відносно низькому рівні шуму та характеристику споживання енергії типу «неперевантажуваний», максимальне споживання енергії відбувається в точці близькій до оптимальної продуктивності, так що будь-яка зміна з цієї точки внаслідок змін опору системи призведе до меншого споживання енергії. Форма лопатей визначає накопичення на них матеріалів, тому використання цих вентиляторів слід обмежувати, як зазначено нижче:

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Лопаті рівномірної товщини – суцільні лопаті, що дозволяють працювати з трохи брудним або вологим повітрям. Не слід використовувати з повітрям, що містить тверді матеріали, оскільки вони мають тенденцію накопичуватися на задній частині лопатей. Лопаті нахилоного крила дозволяють досягати більшої продуктивності та більш тихої роботи [12]. Порожнисті лопаті швидко піддаються ерозії і можуть заповнюватися рідиною при високій вологості, тому їх використання обмежене застосуванням, де обробляється чисте повітря. Відцентрові радіальні лопаті мають робоче колесо з лопатями, які розташованими радіально. Корпус розроблений таким чином, щоб на вході та виході досягалися швидкості транспортування матеріалів. Радіальне розташування лопатей запобігає накопиченню матеріалів на них. У такого типу вентиляторів периферійна швидкість середня і використовується у багатьох системах локального видалення. Беручи до уваги принцип конвекції, доцільно застосовувати осьові вентилятори для забезпечення ефекту конвекції в сушарці, тобто циркуляції повітря всередині камери сушіння, оскільки потік повітря, що виходить є радіальним, а разом із конструкцією камери сушіння це забезпечить ефект конвекції в камері сушіння.

Транспортна підсистема. Основна функція конвеєрної стрічки полягає в безпосередній підтримці матеріалу для транспортування та переміщенні його від точки завантаження до точки розвантаження. Сучасні конвеєрні стрічки можуть транспортувати сировини під кутом до 45°. Зазвичай, для створення руху конвеєрної стрічки, стрічка тягнеться тертям її барабанів, які в свою чергу приводяться в дію їхнім двигуном [29]. Тертя є результатом застосування напруги до конвеєрної стрічки, зазвичай за допомогою натягувача на гвинті або різьбовому натяжному механізмі. Інший барабан зазвичай обертається вільно, без будь-якого приводу і його функція полягає в забезпеченні повернення стрічки. Стрічка підтримується роликми між двома барабанами, які виконують ту ж функцію але з різними властивостями. Через рух стрічки матеріал, що осідає на ній, транспортується до приводного барабана, де стрічка обертається і розвертається у зворотному напрямку. У цій зоні матеріал, що осідає на стрічці, вивантажується з неї під дією гравітації та/або інерції. Зазвичай на автоматизованих транспортерних стрічках він може мати здатність розрізняти транспортовані матеріали за допомогою автономної системи, яка направляє матеріали різними каналами відповідно до потреб підприємства. Типи конвеєрних стрічок [11]:

- стрічка з плетеної нержавіючої дротяної сітки, яка направляється ланцюгами;
- стрічка з перфорованих та шарнірних листів, яка направляється ланцюгами;
- стрічка з плетеної дротяної сітки без ланцюгів;
- стрічка з гнучких пластин, яка направляється ланцюгами.

Розрахунок напруги стрічки [29]

$$P = ((M + 2W) * F_W + M_P) * L + (M + H)$$

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

де M – вантаж продукту, $\text{кг}/\text{м}^2$;
 W – вага стрічки, $\text{кг}/\text{м}^2$;
 L – довжина конвеєра, м;
 H – зміна висоти конвеєра, м;
 F_W – коефіцієнт тертя, напрямні ремня;
 F_P – коефіцієнт тертя, продукт на ремінь;
 M_P – накопичення сировини на стрічці.

Вага стрічки відносно продукту [29]

$$\frac{12.46 \text{ kg} * 1 \text{ m}^2}{2.4 \text{ m}^2 * x} = 5.19 \text{ kg}/\text{m}^2$$

$$M_P = 0.001557 \text{ kg}/\text{m}^2$$

$$B_P = \left(\left(\frac{5.19 \text{ kg}}{\text{m}^2} + 2 * \frac{1.1 \text{ kg}}{\text{m}^2} \right) * 0.2 + 0.001557 \right) * 3 + \left(\frac{5.19 \text{ kg}}{\text{m}^2} * 0 \right)$$

$$B_P = 4.433 \text{ kg}/\text{m}^2$$

Розрахунок лінійної швидкості стрічки

$$V_L = \emptyset * 2\pi * R_P M_2$$

де V_L – лінійна швидкість;
 $\emptyset$ – діаметр барабана;
 $R_P M_2$ – об/хв вхідного валу.

Лінійна швидкість стрічки [29]

$$V_L = 0,2 \text{ (m)} * 2\pi * 573,75$$

$$V_L = 721 \frac{\text{m}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ (s)}}$$

$$V_L = 12,01 \text{ (m/s)}$$

Потужність, яку повинен мати двигун для переміщення конвеєрної стрічки

$$P = \frac{(W + w) + f * V}{33000}$$

де W – вага вантажу, кг;
 w – вага стрічки, кг;
 f – коефіцієнт тертя.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

$$P = \frac{(12,46 (kg) + 12,96(kg) * 0,35 * 721 (\frac{m}{min}))}{33000}$$

$$P = 0,2$$

Відповідно до результату необхідно вибрати двигун, який перевищує цю потужність. Електричний двигун, який генерує потужність для руху конвеєрної стрічки, має вал діаметром 19 мм, потужністю 1350 об/хв та крутним моментом 4,69 Нм. Потужності більш ніж достатньо для приведення в рух конвеєрної стрічки: асинхронний електродвигун із короткозамкнутим ротором.

Процеси сушіння, транспортування та змішування можуть бути складними, вимагаючи точного контролю таких факторів, як температура, рівень вологості та потік матеріалів. Вибір правильного датчика є ключовим для забезпечення ефективності, безпеки та автоматизації в сучасних конвеєрних системах. В таблиці 2.1 наведено типи сенсорів, їхні функції та застосування.

Таблиця 2.1 – Типи датчиків [30]

Тип датчика	Функції
Датчик наближення	Виявляє об'єкти без фізичного контакту
Фотоелектричний сенсор	Використовує світлові промені для виявлення об'єктів
Індуктивний сенсор	Виявляє металеві об'єкти
Ємнісний сенсор	Виявляє металеві та неметалеві матеріали
Ультразвуковий сенсор	Вимірює відстань за допомогою звукових хвиль
Граничний вимикач	Кінцеві зупинки конвеєра, механічне розташування затворів
Енкодер	Вимірює швидкість і обертання вала, моніторинг швидкості конвеєра
Датчик навантаження / Датчик ваги	Вимірює вагу сировини
Датчик швидкості (тахометр)	Відстежує коливання швидкості
Датчик температури	Контролює рівень тепла обладнання
Датчик вібрацій	Виявляє аномальні коливання. Виявлення несправностей у двигунах, роликах
Датчик нахилу	Вимірює кути нахилу конвеєра. Моніторинг схилів у похилих конвеєрах для безпеки та балансу

Оскільки в багатострічковій сушарці використовується кілька рівнів стрічок, важливо здійснювати контроль за станом механізмів. Тому вважається за доцільне обрати такі датчики для контролю конвеєра:

Датчики швидкості (енкодери) задля контролю швидкості руху кожної стрічки, що критично для точного дотримання часу перебування продукту в камері сушіння. Енкодер – це датчик, який перетворює механічний рух

(обертання або лінійне переміщення) на електричні сигнали. Сигнали використовуються для контролю положення, зворотного зв'язку швидкості або моніторингу руху, що дозволяє пристроям досягати високоточної та ефективної автоматизації. За принципом вимірювання [25, 26, 31]:

- оптичний енкодер використовує фотоелектричне виявлення для вимірювання руху з високою точністю та швидкою реакцією;
- магнітний енкодер виявляє положення через зміни магнітного поля;
- конденсаторний енкодер вимірює рух шляхом варіації ємності, забезпечує високу екологічну стабільність;
- індуктивний енкодер діє на основі електромагнітної індукції, добре підходить для середовищ із сильним забрудненням і вібрації.

Датчики сходження стрічки будуть подавати сигнал про зупинку, якщо стрічка змістилася вбік, щоб запобігти її пошкодженню.

Ультразвуковий датчик, задля виявлення скупчення сировини на конвеєрній стрічці в місцях пересипання з одного рівня на інший. Ультразвукові сенсори або ультразвукові детектори є датчиками наближення, які працюють без механічного тертя та виявляють об'єкти на відстанях від кількох сантиметрів до кількох метрів [27, 29]. Сенсор випромінює звук і вимірює час, який сигнал витрачає на повернення. Коли вони відбиваються від об'єкта, сенсор отримує утворений сигнал і перетворює його на електричні сигнали, які обробляються у приладі оцінки. Сенсори працюють лише там, де є повітря (не можуть працювати у вакуумі, потребують середовища для поширення) і можуть виявляти об'єкти з різними формами, різними кольорами, поверхнями та з різних матеріалів.

Підсистема сушіння. Сушильний конвеєр можна розділити на дві або навіть три зони так, щоб у кожній можна було встановити різні умови сушіння. Конструкція сушарки дозволяє рівномірно змішувати частково сухий продукт наприкінці першої стрічки для проходження через другу стрічку із меншою швидкістю, що сприяє отриманню продуктів вищої якості. Кожна зона може використовувати різний температурний профіль і контроль. Насичене або майже насичене повітря викидається з сушарки через центральний витяжний канал. Функціональні зони багатострічкової сушарки наведено на рисунку 2.3.

I зона – зона інтенсивного випаровування (верхня стрічка) – початковий етап, де сировина має найвищу вологість. Тут використовується найвища температура теплоносія для швидкого видалення поверхневої вологи.

II зона – зона досушування (середня стрічка), де сировина переходить з верхньої стрічки на нижчі, що сприяє його рівномірному нагріванню. Температура в цій зоні нижча, щоб запобігти перегріву продукту.

III зона – зона стабілізації та охолодження – останній етап, де вологість вирівнюється по всьому об'єму сировини. В цій зоні замість гарячого повітря подається повітря кімнатної температури для охолодження перед вивантаженням.

Зазвичай продукт виходить із сушарки при температурі нижче 88° С. Після цього продукт повинен бути належним чином охолоджений. Якщо сировина пакується при високій температурі в упаковці конденсується волога, змочуючи

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зовнішню поверхню сировини, що сприяє росту цвілі. Коли до сушарки додається охолодження то для належного охолодження потрібно 20-25% загального часу перебування у пристрої. Температура добре охолодженого продукту зазвичай на $5,5-8,3^{\circ}\text{C}$ вища за температуру навколишнього середовища при зберіганні [16]. Вологість повітря у будь-якій точці сушильної камери дорівнює вологості повітря на виході з камери. На першій стрічці вологість сировини зменшується більше, на другій стрічці зменшується менше, а на третій майже не випаровується.

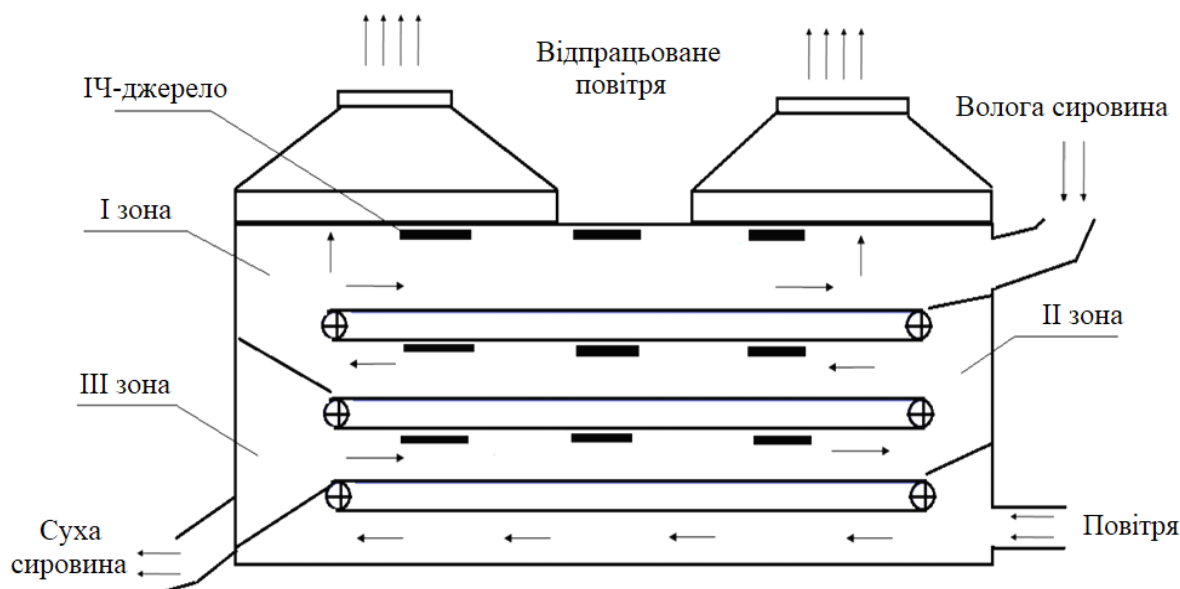


Рисунок 2.3 – Функціональні зони багатострічкової сушарки

Енергію, що міститься в продукті [16, 21]

$$E_p = m_p C_{p_p} T_p$$

де m_p – маса продукту, кг;

T_p – температура продукту, $^{\circ}\text{C}$;

C_{p_p} – об'ємна питома теплоємність продукту становить, $\text{кДж/кг}\cdot\text{K}$.

Питому теплоємність неможливо визначити безпосередньо, тому можна припустити, що питома теплоємність продукту може бути розрахована як комбінація сухої твердої речовини та води. Енергію в продукті можна таким чином розрахувати як суму енергії сухої твердої речовини та води [16, 21]

$$E_p = (m_s C_{p_s} + m_w C_{p_w}) T_p$$

де E_p – енергія продукту, кДж/с ;

m_s – маса твердого тіла, кг;

C_{p_s} – питома теплоємність твердого тіла позначається, $\text{кДж/кг}\cdot\text{K}$;

m_w – маса води в твердому тілі задається, кг;

C_{p_w} – питома теплоємність води, $\text{кДж/кг}\cdot\text{K}$.

$$m_w = m_s X_s$$

де X_s – вологість продукту на вході

$$E_p = m_s (Cp_s + X_s Cp_w) T_p$$

$$E_p = m_s h_s$$

де h_s – ентальпія твердого тіла

$$h_s = (Cp_s + X_{so} Cp_w) T_p$$

Енергія повітря може бути описана майже так само, як і енергія в продукті. Вона є поєднанням питомої теплоємності повітря та питомої теплоємності вологи, що міститься в повітрі. При розгляданні вологи в повітрі важливо враховувати теплоту випаровування, що міститься в повітрі, тоді розрахунок енергії повітря можна сформулювати наступним чином [16, 21]

$$E_g = (m_a Cp_a + m_v Cp_v) T_g + \Delta H_s m_v$$

де m_a – маса повітря, кг;

Cp_a та Cp_v – питома теплоємність повітря та питома теплоємність пари, кДж/кг·К;

T_g – температура газу;

m_v – маса пари в повітрі позначається, кг.

Енергетичні витрати продукту, пов'язані з роботою сушарки, можуть бути складними для визначення. Для точного визначення енергетичного балансу в сушарці необхідно враховувати приховану теплоту та питому теплоємність. Потрібну енергію можна описати як енергію, що використовується для підвищення температури продукту (включаючи наявну вологу) та приховану теплоту випаровування видаленої вологи. Результати розрахунку багатострічкової сушарки наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку багатострічкової сушарки

Продуктивність установки за вологим продуктом, кг/год	146,6
Продуктивність установки за випарованою вологою, кг/год.	96,6
Кількість випареної вологи в 1-й зоні (на верхній стрічці), кг/год	58,6
Кількість вологи сировини, що подається за одиницю часу у 2-у зону (на другу стрічку), кг/год.	88
Кількість випарованої вологи у 2-й зоні (на другій стрічці), кг/год.	33
Кількість сировини, що подається за одиницю часу у 3-ю зону (на третю стрічку), кг/год.	55
Кількість випарованої вологи у 3-й зоні, кг/год.	4,99

Вологість повітря у будь-якій точці сушильної камери дорівнює вологості

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повітря на виході з камери. На першій стрічці вологість сировини зменшується більше, на другій стрічці зменшується менше, а на третій майже не випаровується. На першому конвеєрі вологість знижується з 70% до 45%, на другому конвеєрі знижується з 45% до 19%, на третій зоні – з 19% до 12 %.

Вважається за доцільне обрати такі датчики для контролю процесу сушіння:

Датчики температури вимірюватимуть температуру повітря в кожній зоні сушіння та температуру самого продукту, що забезпечить запобігання пересушення сировини. Датчики температури – це пристрої, які розроблені для точного вимірювання температури. У конвекційних сушарках температурні датчики стратегічно розташовані для моніторингу та регулювання циркуляції гарячого повітря в камері сушіння. Датчики дозволяють точно контролювати температуру сушіння, забезпечуючи оптимальні умови сушіння для різної сировини. Датчики температури мають безліч переваг у процесах сушіння, підвищуючи ефективність, безпеку та загальну продуктивність [32, 33, 35]:

- датчики температури забезпечують точний контроль температури, оптимізуючи процес сушіння для максимальної ефективності, сприяють швидшому сушінню та зменшують енергоспоживання, роблячи процес сушіння більш економічним;

- завдяки точному моніторингу та контролю температури датчики допомагають зберігати якість сушеного продукту, запобігають надмірному висихнанню, забезпечуючи збереження кінцевих характеристик і характеристик;

- забезпечуючи роботу процесу сушіння при найкращій температурі, датчики температури сприяють значній економії енергії, що особливо важливо в сучасному світі, де збереження енергії є ключовим питанням.

Датчики вологості будуть встановлені на вході та виході сушильного обладнання, а також між стрічками. Датчики вологості призначені для визначення рівня вологості всередині сушильної камери та автоматично коригувати час сушіння на основі цієї інформації. Вологість є показником процесу сушіння, оскільки впливає на сухість твердих частинок з якими вона контактує [33, 34]. Тому доцільно встановлення датчика на вході сушарки, що допоможе перевірити вхідні умови повітря, виявити чи працюють попередні нагрівачі або зволожувачі належним чином, забезпечуючи початок процесу в оптимальних умовах. Датчики на виході сушарки дозволять перевірити сухість кінцевого продукту. Моніторинг цієї точки допоможе запобігти надмірному висихнанню або залишковій вологі, захищаючи як цілісність так і консистенцію продукту.

На основі вище зазначеного можна вважати, що багатострічкова конвеєрна сушарка має недолік у тому, що для неї не можна встановити справжній температурний профіль але оскільки вона має низку конвеєрів один над одним сушіння може бути в кілька разів довшим, ніж у еквівалентної одноступеневої сушарках, а повітряний потік через шар продукту може бути нерівномірним. Нерівномірний розподіл вологи в продукті не можна уникнути але його можна мінімізувати в межах продукту, що вимагає забезпечити

однорідний вміст вологи в продукті, через рівномірних нагрів сировини. Тому запропоновано оптимізовану конструкцію багатострічкової сушарки з комбінованим інфрачервоним підведенням теплоти. Велика перевага ІЧ-нагрівання полягає в тому, що його можна застосовувати безперервно або періодично для економії енергії та покращення якості продукції. Оптимізовано підсистеми комбінованої конвеєрної сушарки:

Підсистема завантажування та розподілу сировини. Повітряний потік через шар продукту повинен бути рівномірним, щоб забезпечити однорідний вміст вологи в продукті. Тому доцільно встановити розподільники для забезпечення рівномірного розподілу продукту скребкового типу. Скребки рівномірно розподілятимуть вологий матеріал по всій ширині стрічки. Завдяки формі скребка сировина розміщатиметься по центру до країв стрічок, що є критичним, оскільки тонкий і рівномірний шар сушитиметься швидше.

Механічна підсистема. Беручи до уваги принцип конвекції, доцільно застосовувати осьові вентилятори для забезпечення ефекту конвекції в сушарці, тобто циркуляції повітря всередині камери сушіння, оскільки потік повітря, що виходить є радіальним, а разом із конструкцією камери сушіння це забезпечить ефект конвекції в камері сушіння.

Транспортна підсистема. Оскільки в багатострічковій сушарці використовується кілька рівнів стрічок, важливо здійснювати контроль за станом механізмів. Тому доцільне обрати такі датчики для контролю конвеєра:

- датчики швидкості (енкодери) задля контролю швидкості руху кожної стрічки, що критично для точного дотримання часу перебування продукту в камері сушіння;
- датчики сходження стрічки будуть подавати сигнал про зупинку, якщо стрічка змістилася вбік, щоб запобігти її пошкодженню;
- ультразвуковий датчик задля виявлення скупчення сировини на конвеєрній стрічці в місцях пересипання з одного рівня на інший.

Підсистема сушіння. Сушильний конвеєр можна розділити на дві або навіть три зони так, щоб у кожній можна було встановити різні умови сушіння.

I зона – зона інтенсивного випаровування (верхня стрічка) – початковий етап, де сировина має найвищу вологість. Тут використовується найвища температура теплоносія для швидкого видалення поверхневої вологи.

II зона – зона досушування (середня стрічка), де сировина переходить з верхньої стрічки на нижчі, що сприяє його рівномірному нагріванню. Температура в цій зоні нижча, щоб запобігти перегріву продукту.

III зона – зона стабілізації та охолодження – останній етап, де вологість вирівнюється по всьому об'єму сировини. В цій зоні замість гарячого повітря подається повітря кімнатної температури.

Для підсистеми сушіння вважається за доцільне обрати такі датчики:

- датчики температури вимірюватимуть температуру повітря в кожній зоні сушіння та температуру самого продукту, що забезпечить запобігання пересушення сировини;
- датчики вологості будуть встановлені на вході та виході сушильного обладнання, а також між стрічками.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вплив висоти шару продукту на сушіння

Сушіння є однією з найдавніших технік, що використовуються для збереження продуктів харчування – це один із найефективніших процесів для збереження харчових продуктів, який базується на видаленні води шляхом застосування тепла. Операція сушіння також призводить до значного зменшення ваги та об'єму продуктів, що висушуються, що дозволяє суттєво зменшити витрати на транспортування та зберігання цих продуктів [18]. Операція сушіння передбачає низку фізичних, хімічних та сенсорних змін у харчовому продукті, що залежать від його складу, а також від методу сушіння. Прикладами цих змін є усадка, кристалізація, деполімеризація, зміни кольору, смаку, текстури, в'язкості, швидкості відновлення, харчової цінності та стабільності при зберіганні. Фактори, пов'язані з якістю продукту, слід аналізувати при проектуванні операції зневоднення продуктів харчування, щоб спричинити мінімальні пошкодження продукту. Сушіння зменшує вміст вологи у харчовому продукті, щоб покращити термін зберігання та забезпечити можливість зберігання за кімнатної температури. Важливо мінімізувати вологість у продуктах до безпечних меж, які відрізняються для кожного продукту. Неправильна сушка може спричинити ріст цвілі та поставити під загрозу безпечне зберігання продукту.

На ефективність сушильного обладнання впливають різні фактори, такі як висота шару продукту, швидкість повітря через шар, температура повітря, щільність продукту, насипна щільність, форма продукту. Тому доцільно дослідити вплив висоти шару продукту на процес сушіння. Процес сушіння зазвичай відбувається за високої температури повітря але частина сушіння також відбувається при температурі навколишнього повітря. Якщо можна використовувати повітря при температурі навколишнього середовища замість нагрітого це могло б значно знизити витрати на виробництво. Швидкість повітря має великий вплив на швидкість сушіння та на продукт із низьким внутрішнім опором до переносу вологи. Однак для продукту з високим опором до переносу вологи швидкість повітря має невеликий вплив на швидкість сушіння [19-21, 22]. Вищі температури шару призводять до вищих швидкостей видалення вологи та дифузійних коефіцієнтів. Ефект дифузії є складним і значною мірою залежить від значимості внутрішнього та зовнішнього опору переносу вологи. Збільшення потоку повітря також збільшує споживання енергії. Дрібніші зерна мають вищий опір потоку повітря, що призводить до збільшення видалення вологи та зниження продуктивності вентилятора, а отже, до підвищення ефективності енерговитрат.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Богдан			Удосконалення конструкційно- технологічних параметрів конвеєрної сушарки				Лім.		Арк.	Аркуші
Перевір.		Гончаренко									39	5
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО			
Н. Контр.		Омельченко										
Затверд.		Цвіркун										

Внутрішній опір продукту сильно впливає на швидкість сушіння та перенесення вологи, тому його температура має більший вплив на швидкість сушіння, ніж на швидкість потоку повітря. Збільшення швидкості повітря зменшує зовнішній опір масопереносу, що призводить до збільшення швидкості сушіння. Таким чином, без підвищення температури єдиний спосіб збільшити швидкість сушіння – це збільшення швидкості повітря і через високий внутрішній опір продукту відбудеться мало дифузії [22, 23]. Більше випаровування вологи відбувається, коли висота шару збільшується. Однак порожнистість (пористість шару) не має значного впливу на ефективність сушіння. Порівнюючи сушіння паралельним потоком і зустрічним потоком, очевидно, що сушіння зустрічним потоком є більш ефективним для сушіння з точки зору швидкості сушіння та розміру сушарки, коли як сушильний агент використовується повітря. Кут природного укладання – основна властивість сировини є максимальним кутом нахилу при якому матеріал перебуває в стані спокою. Для зернової сировини кут укладання зазвичай знаходиться між 30° і 40° . Чим більше вміст вологи тим більшим кут, оскільки волога проявляє зв'язуючий ефект. Шар зернової сировини у вигляді синусоїдальної хвилі наведено на рисунку 3.1.

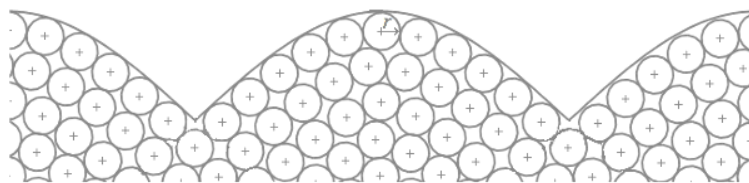


Рисунок 3.1 – Шар зернової сировини у вигляді синусоїдальної хвилі

Тому доцільно дослідити вплив висоти шару продукту на процес сушіння:

- сушарка ідеально ізольована;
- тверді частинки однорідні за розміром, сферичні та однорідні;
- фізичні властивості продукту залишаються незмінними з часом;
- зменшення об'єму твердих частинок та градієнт температури всередині сировини ігноруються.

Під час дослідження проводилися вимірювання повітря, що виходить, після проходження через вологу сировину. Сухий термометр знімав показники відносної вологості та температури сухого повітря з інтервалом у дві секунди. Дані були нанесені на графік, який відображає зміну температури та відносної вологості з часом (рис. 3.2). На основі отриманої інформації можна зробити висновки щодо впливу висоти шару та швидкості повітря в процесі сушіння сировини [22, 23]. Вплив висоти шару і швидкості повітря на втрату вологи. Буде розглянуто поведінку втрати вологи в шарі сировини при різних висотах шару та швидкостях сушильного повітря. Висота шару та швидкість повітря впливають на температуру. Загальна кількість вологи втраченої продуктом збільшується зі збільшенням глибини шару через зниження швидкості сушіння і збільшення кількості продукту в шарі. Втрата вологи переважно залежить від зменшеної швидкості сушіння, що дозволяє збільшити втрату вологи у процесі сушіння, що призводить до збільшеного випаровування.

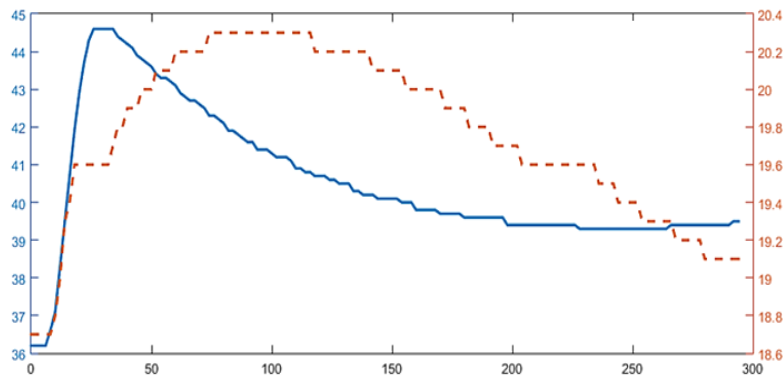


Рисунок 3.2 – Температура та відносна вологість на глибині шару 0,1 м

Різниця температури повітря на глибині шару 0,1 м, 0,2 м, 0,3 м, 0,4 м наведено на рисунку 3.3. Показано поведінку температури вихідного повітря при постійній швидкості повітря 1,8 м/с та різних висотах шару. Крива більш-менш однакова для всіх швидкостей повітря і цей графік ілюструє типову криву, що вказує на вплив висоти шару продукту на зміну температури вихідного повітря. Висоту шару змінювали від 0,1 м до 0,4 м з кроком 0,1 м. На графіку показано різницю температур між навколишнім повітрям і вихідним повітрям, що проходило через продукт. Швидкість зберігалася постійною, навіть якщо існувала різниця тиску над шаром через зміну висоти шару.

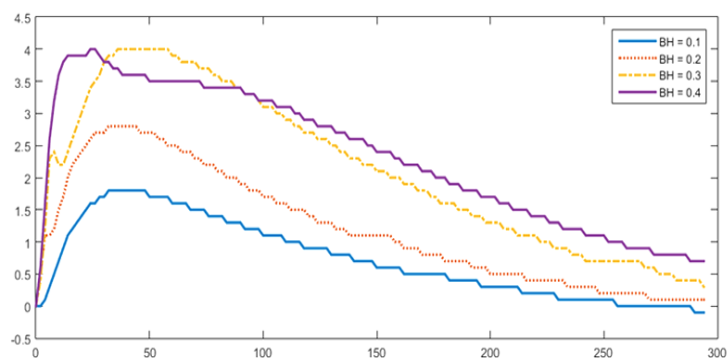


Рисунок 3.3 – Різниця температури повітря на різних висотах шару продукту

Випаровування вологи з поверхні сировини підвищує температуру повітря завдяки теплу вологи на поверхні. Можна зробити висновок, що чим більша площа контакту між сировиною та повітрям при постійній швидкості теплообміну, тим більше зростає температура вихідного повітря. Швидкість зміни температури на початку випробування була однаковою для всіх висот шару. Однак період часу зміни температури на початку був більшим для висоти шару 0,4 м, ніж для висоти 0,1 м, що спричинило більшу різницю температур на початку випробування та збільшило час, необхідний продукту для досягнення кімнатної температури [22, 23]. Це пояснюється збільшеною площею шару продукту та об'ємом продукту. Чим більший об'єм продукту в шарі тим більше тепла доступно. Підвищення температури поверхневої вологи призводить до

зниження тиску пари вологи, що збільшує різницю між тиском пари вологи на поверхні сировини та парціальним тиском вологи в повітрі, що, у свою чергу, призводить до збільшення масопереносу.

Коли сировина потрапляє в сушильну камеру то волога на поверхні випаровується через різницю парціальних тисків. Коли сировина піддається потоку повітря за температури навколишнього середовища то вони поступово втрачали здатність випаровувати вологу. Тому, чим повільніше сушіння тим довше волога має час на вихід шляхом випаровування. Температура досягне температури навколишнього середовища і волога з продукту перестане випаровуватися. Коли температура мокрого термометра повітря буде дорівнювати температурі поверхні сировини то не відбуватиметься обмін енергією при відсутності різниці парціальних тисків.

Швидкість повітря має значний вплив на швидкість сушіння з точки зору загальної втрати вологи у шарі продукту. Коли повітря надходить у продукт знизу то температура повітря підвищуватиметься під час його руху вгору через продукт, а потім поступово охолоджуватиметься. Тому мала глибина шару збільшує швидкість охолодження, а отже, зростає ймовірність теплового шоку. Що стосується впливу швидкості повітря то при високій швидкості повітря видаляється більше вологи, оскільки це збільшує швидкість масопереносу. У глибокому шарі спостерігається зміна осьової швидкості повітря біля стінки шару при зміні пористості. Така поведінка швидкості впливає на коефіцієнт теплового та масопереносу в глибокому шарі, і цей ефект, збільшується зі збільшенням висоти шару [22, 23]. У отриманих результатах вміст вологи у вихідному повітрі збільшувався зі збільшенням швидкості повітря. Зі збільшенням масового потоку збільшувався також коефіцієнт масопереносу, що призводило до швидшої швидкості випаровування. Зі збільшенням швидкості підвищувався також статичний тиск над шаром, коефіцієнт теплопередачі та випаровування збільшується зі збільшенням швидкості, а швидкість сушіння збільшується зі збільшенням витрати повітря і зменшується при збільшенні вихідної вологості. Можна зробити наступні висновки:

- швидкість повітря через шар продукту та висота шару продукту впливають на швидкість сушіння та втрату вологи сировини;
- загальна кількість вологи втраченої продуктом у атмосферу збільшується зі збільшенням глибини шару через зниження швидкості сушіння і збільшення кількості продукту в шарі;
- загальна кількість вологи, яка втрачена продуктом у атмосферу збільшувалася зі збільшенням швидкості повітря через шар продукту;
- збільшення втрати вологи зі зростанням швидкості повітря головним чином відбувається через збільшення масового потоку, тому збільшуючи швидкість повітря волога може залишати сировину швидше;
- збільшення висоти шару продукту може призвести до зниження швидкості сушіння, що потребує довшого часу для випаровування вологи з поверхні сировини;
- втрата вологи переважно залежить від зменшеної швидкості сушіння, що дозволяє збільшити втрату вологи у процесі, що призводить до збільшеного

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випаровування;

– шар сировини повинен залишатися теплим якомога довше, щоб збільшити втрату вологи, що може відбуватися при збільшенні глибини шару.

На основі вище зазначеного можна вважати, що на ефективність сушильного обладнання впливають різні фактори, такі як висота шару продукту, швидкість повітря через шар, температура повітря, щільність продукту, насипна щільність, форма продукту. Важливо мінімізувати вологість у продуктах до безпечних меж, які відрізняються для кожної сировини. Тому доцільно дослідити вплив висоти шару продукту на процес сушіння.

Буде розглянуто поведінку втрати вологи в шарі сировини при різних висотах шару та швидкостях сушильного повітря. Висоту шару змінювали від 0,1 м до 0,4 м з кроком 0,1 м. Отримана крива приблизно однакова для всіх швидкостей повітря, що вказує на вплив висоти шару продукту на зміну температури вихідного повітря. Швидкість зберігалася постійною, навіть якщо існувала різниця тиску над шаром через зміну висоти шару. Можна зробити висновок, що чим більша площа контакту між сировиною та повітрям при постійній швидкості теплообміну, тим більше зростає температура вихідного повітря. Швидкість зміни температури на початку випробування була однаковою для всіх висот шару. Однак період часу зміни температури на початку був більшим для висоти шару 0,4 м, ніж для висоти 0,1 м, що спричинило більшу різницю температур на початку випробування та збільшило час, необхідний продукту для досягнення кімнатної температури. Це пояснюється збільшеною площею шару продукту та об'ємом продукту. Чим більший об'єм продукту в шарі, тим більше тепла доступно. Підвищення температури поверхневої вологи призводить до зниження тиску пари вологи, що збільшує різницю між тиском пари вологи на поверхні сировини та парціальним тиском вологи в повітрі, що, у свою чергу, призводить до збільшення масопереносу.

Зазначено, що швидкість повітря має значний вплив на швидкість сушіння з точки зору загальної втрати вологи у шарі продукту. Що стосується впливу швидкості повітря, то при високій швидкості повітря видаляється більше вологи, оскільки це збільшує швидкість масопереносу. Загальна кількість вологи втраченої продуктом у атмосферу збільшується зі збільшенням глибини шару через зниження швидкості сушіння і збільшення кількості продукту в шарі. Загальна кількість вологи, втраченої продуктом у атмосферу збільшувалася зі збільшенням швидкості повітря через шар продукту. Збільшення втрати вологи зі зростанням швидкості повітря головним чином відбувається через збільшення масового потоку. Тому, збільшуючи швидкість повітря, волога може залишати сировину швидше.

Збільшення висоти шару продукту може призвести до зниження швидкості сушіння, що потребує довшого часу для випаровування вологи з поверхні сировини. Втрата вологи переважно залежить від зменшеної швидкості сушіння, що дозволяє збільшити втрату вологи у процесі, що призводить до збільшеного випаровування. Тому шар сировини повинен залишатися теплим якомога довше, щоб збільшити втрату вологи, що може відбуватися при збільшенні глибини шару.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота присвячена удосконаленню конструкційно-технологічних параметрів конвеєрної сушарки. У роботі зазначено, що однією з найважливіших властивостей у будь-якому процесі сушіння харчових продуктів є зниження активності води в продуктах до конкретного визначеного рівня, оскільки це покращує стабільність продукту та мінімізує хімічні та фізичні зміни, що відбуваються під час зберігання.

Здійснено аналіз обладнання для сушіння харчової сировини. Зазначено, що при зневодненні вода видаляється із сировини за допомогою сушарок гарячим повітрям, наприклад, шафових, тунельних, конвеєрних та з псевдозрідженим шаром або за допомогою сушарок з нагрітими поверхнями, наприклад, барабанних та вакуумних сушарок. Процес сушіння не лише зневоднює продукт але й зменшує його вагу та об'єм, що знижує витрати на пакування та транспортування. Зневоднення також має значний вплив на сенсорні властивості продуктів харчування і певні зневоднені продукти відновлюються водою перед споживанням.

Аналіз наукових джерел дав змогу визначити, що конвеєрні сушарки є безперервними сушарками з циркуляцією повітря через матеріал або паралельно з ним, який переміщається по конвеєру з перфорованою стрічкою. У сушарках з конвеєрною стрічкою теплообмін відбувається конвекцією між продуктом і нагрітим потоком повітря. Енергія, яка необхідна для випаровування вологи з продукту подається на відкриту поверхню матеріалу за допомогою конвекції після чого випарована волога відноситься рухом повітря.

Зазначено, що однострічкові сушарки – це найпростіша конвеєрна сушарка безперервної дії, де продукт подається на конвеєрну стрічку, яка потім транспортує його поки гаряче повітря пропускається через шар продукту. Шар продукту, повітряний потік і температура залишаються постійними по всій камері. Багатострічкові сушарки містять низку стрічок, щоб продукт циркулював всередині сушильного обладнання, оскільки існують деякі продукти, яким потрібен триваліший час у сушарці. Продукт потрапляє у сушарку зверху, а потім рухається вниз до нижніх стрічок – це найпопулярніша конфігурація, яку знаходять у промисловості.

Удосконалено конструкційно-технологічні параметри конвеєрної сушарки. Зазначено, що багатострічкова конвеєрна сушарка має недолік у тому, що для неї не можна встановити справжній температурний профіль але оскільки вона має низку конвеєрів один над одним сушіння може бути в кілька разів довшим, ніж у еквівалентної одноступеневої сушарки, а повітряний потік через шар продукту може бути нерівномірним. Нерівномірний розподіл вологи в продукті не можна уникнути але його можна мінімізувати в межах продукту, що вимагає забезпечити однорідний вміст вологи в продукті, через рівномірний

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Богдан			Удосконалення конструкційно- технологічних параметрів конвеєрної сушарки			Літ.		Арк.	Аркушів	
Перевір.		Гончаренко								44	2	
								ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.		Омельченко										
Затверд.		Цвіркун										

нагрів сировини. Тому запропоновано конструкцію багатострічкової сушарки з комбінованим інфрачервоним підведенням теплоти. Велика перевага ІЧ-нагрівання полягає в тому, що його можна застосовувати безперервно або періодично для економії енергії та покращення якості продукції.

Оптимізовано підсистеми комбінованої конвеєрної сушарки:

Підсистема завантажування та розподілу сировини. Повітряний потік через шар продукту повинен бути рівномірним, щоб забезпечити однорідний вміст вологи в продукті. Тому доцільно встановити розподільники для забезпечення рівномірного розподілу продукту скребкового типу. Скребки рівномірно розподілятимуть вологий матеріал по всій ширині стрічки. Завдяки формі скребка сировина розміщатиметься по центру до країв стрічок, що є критичним, оскільки тонкий і рівномірний шар сушитиметься швидше.

Механічна підсистема. Беручи до уваги принцип конвекції, доцільно застосовувати осьові вентилятори для забезпечення ефекту конвекції в сушарці, тобто циркуляції повітря всередині камери сушіння, оскільки потік повітря, що виходить є радіальним, а разом із конструкцією камери сушіння це забезпечить ефект конвекції в камері сушіння.

Транспортна підсистема. Оскільки в багатострічковій сушарці використовується кілька рівнів стрічок, важливо здійснювати контроль за станом механізмів. Тому доцільне обрати такі датчики для контролю конвеєра:

- датчики швидкості (енкодери) задля контролю швидкості руху кожної стрічки, що критично для точного дотримання часу перебування продукту в камері сушіння;
- датчики сходження стрічки будуть подавати сигнал про зупинку, якщо стрічка змістилася вбік, щоб запобігти її пошкодженню;
- ультразвуковий датчик задля виявлення скупчення сировини на конвеєрній стрічці в місцях пересипання з одного рівня на інший.

Підсистема сушіння. Сушильний конвеєр можна розділити на дві або навіть три зони так, щоб у кожній можна було встановити різні умови сушіння.

I зона – зона інтенсивного випаровування (верхня стрічка) – початковий етап, де сировина має найвищу вологість. Тут використовується найвища температура теплоносія для швидкого видалення поверхневої вологи.

II зона – зона досушування (середня стрічка), де сировина переходить з верхньої стрічки на нижчі, що сприяє його рівномірному нагріванню. Температура в цій зоні нижча, щоб запобігти перегріву продукту.

III зона – зона стабілізації та охолодження – останній етап, де вологість вирівнюється по всьому об'єму сировини. В цій зоні замість гарячого повітря подається повітря кімнатної температури.

Для підсистеми сушіння вважається за доцільне обрати такі датчики:

- датчики температури вимірюватимуть температуру повітря в кожній зоні сушіння та температуру самого продукту, що забезпечить запобігання пересушення сировини;
- датчики вологості будуть встановлені на вході (задля виявлення чи працюють попередні нагрівачі або зволожувачі) та на виході сушильного обладнання (перевірити сухість кінцевого продукту), а також між стрічками.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналіз сучасних способів сушіння рослинної сировини та існуючі конструкції сушильного устаткування. Режим доступу: <https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/6436/1/27.pdf>.
2. Інфрачервоне та конвекційне сушення продуктів. Режим доступу: <https://sergio.com.ua/info/infrachervone-ta-konvektsiine-sushennia-produktiv>.
3. Інфрачервоне нагрівання та сушіння в харчовій промисловості та сільському господарстві. Режим доступу: <https://globalquartztube.com/uk/infrared-heating-drying-in-food-agriculture/>.
4. Estudio del modelo matemático de las ecuaciones acopladas de transferencia de masa y calor durante el secado de alimentos. URL: <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/1604/1/2019%20Vargas%20Gonzalez%20Sarai.pdf>
5. Diseño de una secadora automática para granos de cacao con capacidad para 60 kg. URL: <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5fa73560-7bc2-4edd-b3bc-704fd12f0d82/content>.
6. Desarrollo de un prototipo de una máquina de secado para frutas tropicales. URL: <https://repository.upb.edu.co/server/api/core/bitstreams/24d2e701-a287-4c60-a0ca-f4f6830af097/content>.
7. Сублімаційна сушка продуктів. Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/sublimatsionnaya-sushka-produktov/>.
8. Конвективні сушарки: тунельні і стрічкові. Призначення, пристрій і принцип дії. Режим доступу: http://ni.biz.ua/8/8_14/8_147041.
9. Конвеєрні сушарки. Режим доступу: <https://www.scolari.com.ua/produkty/susharki/konveierni/>.
10. Diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao. URL: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21412/1/UPS-CT009410.pdf>.
11. Alvarado A.A. Investigacion de secador de cinta transportadora (conveyor band dryer) / Experiencia educativa op. Transferencia de masa humidificacion y secado. №25. 2014. 24 p.
12. Diseño de un secador de banda continua para algodón en la empresa mayordent. URL: <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/d48f0c07-0d78-4924-9d9c-309bfcd9b39ba/content>.
13. Поперечного А.М. Процеси і апарати харчових виробництв. К. Центр учбової літератури. 2007. 301 с.
14. Шалугін В.С. Процеси та апарати промислових технологій. К.: Центр учбової літератури. 2008. 392 с.
15. Самойчук К.О. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси. К.: ПрофКнига, 2021. 466 с.
16. Procedure for conveyer-belt dryer sizing using dehydration-rate curves. URL: <https://repository.nwu.ac.za/server/api/core/bitstreams/077378a9-9f25-4ad6-a109-2e496af7f853/content>.
17. Conveyor dryers. URL: <https://www.sakav.com/conveyor-dryers.html>.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

18. Aplicacion de un proceso de secado asistido infrarrojo para la deshidratacion del fruto de murtilla. URL: <https://www.bing.com/search>.
19. Мирончук В.Г. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості. Вінниця Нова книга, 2007. 648 с.
20. Процеси і апарати харчових виробництв / За ред. І.Ф. Малєжика. К.: НУХТ, 2003. 400 с.
21. Драгілев А.І. Технологічні машини і апарати харчових виробництв. Колос, 1999. 376 с.
22. Effect of product bed height and air velocity on the drying rate of extruded maize pellets. URL: <https://repository.nwu.ac.za/server/api/core/bitstreams/da26b980-528c-454b-af2f-6a4c4d95a3dc/content>.
23. Effect of product distribution geometry on drying of extruded maize pellets. URL: <https://repository.nwu.ac.za/server/api/core/bitstreams/f954f7b8-670d-4b02-905a-d6f06a37a92f/content>.
24. Diseño, construcción y automatización de una cinta transportadora para la simulación mecánica de un proceso industrial. URL: [file:///C:/Users/admin/Downloads/TEG_GOMEZ_FAVA%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/admin/Downloads/TEG_GOMEZ_FAVA%20(1).pdf).
25. Датчик швидкості: принцип роботи, типи, характеристики, встановлення та використання. Режим доступу: <https://ua.allelcoelec.com/blog/Speed-Sensor-Working-Principle,Types,Specifications,Installation,and-Uses.html>.
26. Датчики швидкості. Режим доступу: <https://taho.com.ua/blog/speed-sensors-all-you-need-know>.
27. Ультразвукові датчики: принцип дії та застосування. Режим доступу: <https://www.bjultrasonic.com/uk/what-is-an-ultrasonic-sensor/>.
28. Diseño y análisis estructural de una banda transportadora de pesos para una empresa de alimentos empleando softwares de ingeniería. URL: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27438/1/UPS-GT004976.pdf>.
29. Estudio y diseño de cinta transportadora automatizada. URL: <https://repositorio.usm.cl/server/api/core/bitstreams/054bcdcf-e0fd-4f78-8b28-5ab8d75929b3/content>.
30. Types of sensors used in conveyors. URL: <https://synergyautomatics.in/types-of-sensors-used-in-conveyors/>.
31. Encoder basics. URL: <https://encoder.wiki/>.
32. Датчики температури. Режим доступу: <https://ukrayinska.libretexts.org>.
33. Датчики температури і вологості: види, принцип роботи та застосування. Режим доступу: <https://tribun.com.ua/uk/118071-datchiki-temperaturi-i-vologosti-vidi-printsip-roboti-ta-zastosuvannja>.
34. Датчики вологості все, що необхідно знати про прилади. Режим доступу: <https://yak.koshachek.com/articles/datchiki-vologosti-vse-shho-neobhidno-znati-pro.html>.
35. Temperature sensors. URL: <https://goodesensor.com/2023/09/18/temperature-sensors-in-dryers/>.