

Луцький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)  
Факультет аграрних технологій та екології  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))  
Кафедра аграрної інженерії ім. проф. Г.А.Хайліса  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

на тему: «Дослідження процесу сушіння фруктів з обґрунтуванням параметрів геліосушарки»

Виконав: студент 2 курсу, групи АІм - 21  
спеціальності 208 Агроінженерія  
за освітньо-професійною  
програмою «Агроінженерія»

Руденко-Сукач С.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник Забродоцька Л.Ю.

(прізвище та ініціали)

Гарант ОП Хомич С.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Дударєв І.М.

(прізвище та ініціали)

Луцьк 2025

**ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет	<i>аграрних технологій та екології</i>
Кафедра	<i>аграрної інженерії ім. проф. Г.А.Хайліса</i>
Галузь знань	<i>20 Аграрні науки та продовольство</i>
Освітній ступінь	<i>магістр</i>
Спеціальність	<i>208 Агроінженерія</i>
Освітньо-професійна програма	<i>Агроінженерія</i>

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри аграрної інженерії  
ім. проф. Г.А.Хайліса

доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_ С.М. Хомич  
«01» липня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТУ**

Руденко-Сукачу Сергію Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи            Дослідження процесу сушіння фруктів з обґрунтуванням параметрів геліосушарки

керівник роботи        Забродоцька Людмила Юріївна, доцент, к.т.н.

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

затверджена наказом ЛНТУ від «01» липня 2025 р. № 459/01-07

2. Термін здачі студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Титульний аркуш .
2. Завдання на роботу магістра.
3. Реферат.
4. Зміст.
5. Вступ.
6. Основну частину.
7. Загальні висновки.
8. Перелік джерел посилань.
9. Додатки

## 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

	к-сть листів
1. Вихідні дані .....	1 лист
2. Теоретичні положення .....	1 лист
3. Апаратура та обладнання для експериментальних досліджень	1 лист
4. Результати експериментальних досліджень	1 лист
5. Планування та результати експерименту з використанням математичного методу планування	1 лист
6. Схема експериментальної установки чи досліджуваної машини (функціональна або принципова)	1 лист
7. Складальне креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	1 лист

## 6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Юхимчук С.Ф., доцент		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою, формування завдань досліджень	01.07. – 16.07.2025 р.	
2	Обґрунтування конструкції і теоретичні дослідження	20.08 – 31.08.2025 р.	
3	Розробка схеми експериментальної установки чи досліджуваної машини	01.09 – 30.09.2025 р.	
4	Розробка програми і методики експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2025 р.	
5	Реалізація та обробка результатів експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2025 р.	
6	Експериментальні дослідження з використанням математичного методу планування	15.10 – 01.11.2025 р.	
7	Розробка креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	01.11 – 15.11.2025 р.	
8	Узагальнення результатів та оформлення пояснювальної записки	15.11 – 25.11.2025 р.	
9	Оформлення ілюстративного матеріалу для захисту магістерської роботи	15.11 – 25.11.2025 р.	
10	Нормоконтроль	до 04.12.2025 р.	
11	Представлення кваліфікаційної роботи на перевірку на плагіат	04.12.– 14.12.2025 р.	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Руденко-Сукач С.А.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Забродоцька Л.Ю.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Гарант ОПП

\_\_\_\_\_ (підпис)

Хомич С.М.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Руденко-Сукач С.А. Дослідження процесу сушіння фруктів з обґрунтуванням параметрів геліосушарки. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Агроінженерія» спеціальності 208 Агроінженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і пропозицій, перелік джерел посилань, додатків.

У кваліфікаційній роботі досліджено фізико-механічні властивості плодоовочеві сировини; обґрунтовано параметри раціональної геліосушильної сушарки, яка здатна забезпечити виробництво сушених продуктів рослинного походження з мінімальними техніко-економічними витратами.

Ключові слова: процес сушіння, конвекція, сушильний агент, вологість, геліосушарка.

## ABSTRACT

Rudenko-Sukach S.A. Investigation of the fruit drying process with justification of solar dryer parameters.

Master's Degree Qualifying Research Paper in Programme Subject Area 0888 Inter-disciplinary programs and qualifications involving agriculture, forestry, fisheries, and veterinary under Agricultural Engineering Educational Program. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's qualification work includes an introduction, four sections, conclusions and proposals, a list of reference sources, and appendices.

The qualification work investigated the physical and mechanical properties of fruit and vegetable raw materials; the parameters of a rational solar dryer were substantiated, which is capable of ensuring the production of dried products of plant origin with minimal technical and economic costs.

Keywords: drying process, convection, drying agent, humidity, solar dryer.

## ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ.....	2
АНОТАЦІЯ.....	3
ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ, ФОРМУВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	9
1.1. Існуючі способи сушіння харчових продуктів рослинного походження.....	9
1.2 Технічні засоби для отримання сушених продуктів рослинного походження.....	13
1.3 Особливості використання сонячної енергії для отримання сушених продуктів рослинного походження.....	15
Висновки до розділу.....	21
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ.....	23
2.1 Процес тепломасообміну в камері геліосушарки.....	23
2.2 Опис запропонованої конструкції.....	24
2.3 Матеріальний і тепловий баланс геліосушки для сушіння фруктів.....	25
2.4 Обґрунтування геометричних параметрів сушарки.....	31
Висновки до розділу.....	36
3 ПРОГРАМА, МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	37
3.1 Методика визначення щільності досліджуваного матеріалу.....	38
3.2 Методика визначення кутів та коефіцієнтів тертя.....	40
3.3 Дослідження темпу нагрівання теплоакumuлюючих матеріалів.....	43
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	45
Висновки до розділу.....	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	48
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	49
ДОДАТКИ.....	51

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Фрукти, як правило, містять до 90% води, 9,5% різних органічних сполук і 0,5% мінеральних речовин. Високий вміст вологи призводить до того, що фрукти та овочі легко уражаються фітопатогенними мікроорганізмами, і збереження врожаю є складним організаційним і технічним завданням. В основному фрукти та овочі споживаються населенням тільки в свіжому вигляді, і тільки частина продукції відправляється на переробку та зберігання. Дещо гірше справа йде з плодоовочевими консервами, в тому числі і з сушеними плодами та овочами. Їх виробництво на душу населення становить в 100 і більше разів нижче розрахункових норм споживання. Від загального обсягу вироблених плодів і овочів на переробку йде не більше одного відсотка. Для порівняння в європейських країнах переробляється близько 50%, а в США до 80% плодів і овочів. І навіть, з урахуванням імпорту, фактичне споживання плодоовочевих консервів в республіці майже в 20 разів нижче розрахункових норм споживання [2]. Крім того, цей показник також залежить від втрат врожаю під час збирання та зберігання. За даними досліджень, вже на стадії заготівлі врожаю, а в подальшому, під час його зберігання, втрати овочевої продукції наближаються до 20–25 %, втрати фруктів досягають 15–18 %. Виходячи з цього, поряд з багатьма способами зберігання і переробки плодоовочевої продукції питання застосування сушіння продукції можна віднести до дуже актуальних завдань на сучасному етапі [3].

Крім традиційних методів сушіння плодоовочевої сировини, сучасні технології базуються на теплоносіях, отриманих шляхом спалювання рідкого та газоподібного палива. З урахуванням того, що дефіцит енергоносіїв та їх вартість в останні роки є актуальною проблемою в суспільстві, використання відновлюваних джерел енергії (вітрової, сонячної та ін.) отримує широке поширення і розвиток.

Висока вартість паливно-енергетичних ресурсів змушує вирішувати питання використання відновлюваних джерел енергії в комплексі з автономними засобами для сушіння фруктів і овочів [4].

Впровадження нових технологій і техніки є найважливішим способом підвищення ефективності роботи сушильних агрегатів і підвищення якості оброблюваного матеріалу. Традиційно, організація технологічних процесів сушіння продуктів здійснюється шляхом використання енергоємних сушильних установок, які споживають традиційні види енергії. Тому дбайливе ставлення до паливно-енергетичних ресурсів є важливим державним і стратегічним завданням [5].

**Практична цінність роботи** . На підставі теоретичних і експериментальних досліджень визначено конструктивні та технологічні параметри геліосушарки , що забезпечують інтенсивність процесу сушіння.

**Об'єкт дослідження** – процес сушіння плодоовочевої продукції, властивості матеріалів, що піддаються сушінню, геліосушильна установка з додатковими геліоколекторами і теплоакумулюючим пристроєм.

**Предмет дослідження** – закономірність процесів сушіння фруктів з використанням сонячної енергії.

**Мета й завдання роботи**. Інтенсифікація процесу виробництва сушених продуктів рослинного походження з використанням сонячної енергії шляхом застосування додаткових колекторів і теплоакумулюючих пристроїв у геліосушарці шахтного типу.

**Завдання дослідження:**

- вивчити фізико-механічні властивості плодоовочевої сировини та теплофізичні властивості;
- обґрунтувати та розробити більш раціональну геліосушильну установку, здатну забезпечити виробництво сушених продуктів рослинного походження з мінімальними техніко-економічними витратами;
- теоретично та експериментально обґрунтувати основні конструктивні та технологічні параметри геліосушарки.

**Методи та способи вирішення поставлених завдань.** У роботі використані загальні та приватні методи. За стандартними методами визначалися: щільність, вологість, витрата та швидкість повітря. Фізико-механічні властивості сировини визначалися методом тензометрії. Теплофізичні властивості визначалися методом регулярного теплового режиму. Дослідження зміни вологості сировини проводилося з використанням теорії планування експерименту.

**Наукова новизна.** Отримано раціональні конструктивні параметри геліосушарки. Виявлено пасивні зони сушильної камери розрахунковим методом. Запропоновано усунення пасивних зон шляхом підведення теплового потоку додатковими геліоколекторами.

**Структура й обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилань із 18 назв та 1 додатку. Основна частина викладена на 51 сторінках та містить 20 рисунки.

## 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ

### 1.1 Існуючі способи сушіння харчових продуктів рослинного походження

Матеріали, що піддаються сушінню, дуже різноманітні за своїми складу. Тому конструкції сушарок мають різноманітність типів і технології сушіння, які можуть відрізнятися за кількома ознаками:

- способи теплопостачання (конвективний і контактний);
- за типом використовуваного теплоносія (повітря і газ);
- тиском в самій камері сушарки (атмосферним і вакуум);
- за способом дії (періодичні та безперервні);
- у взаємному напрямку руху матеріалу і теплоносія в сушарках конвективного типу (прямоточні, перехресні, а також протитечія);
- за станом об'єктів сушіння (нерухомі, безперервно рухомі та тощо).

У кондуктивному способі сушіння теплообмін здійснюється шляхом прямого контакту з нагрівальною поверхнею сушильного обладнання. Але для сушіння рослинних матеріалів цей спосіб використовується не так часто. Великий перегрів через нерівномірну вологість при сушінні сировини призводить до зниження якості кінцевого продукту. Цей спосіб чудово застосовування при сушці пиломатеріалів, а також сировини і виробів в текстильна промисловість [1].

При терморадіальному способі сушіння фруктів хвилями поглинається інфрачервоне випромінювання певної довжини (від 8 до 10 мкм) вода, що міститься у виробках для сушіння, але не вбирається тканиною сушеного продукту. Через це видалення вологи можливе лише за допомогою низької температури (від 40 до 60°C). Це дозволяє майже повністю зберігати велику кількість вітамінів, біологічно активних речовин, натуральний колір, смак і аромат висушених фруктів [2].

Інфрачервоне обладнання використовується для сушіння сушінні овочів і фруктів, а також для м'ясної і рибної сировини, харчових продуктів напівфабрикати, готові страви та закуски, а також страви швидкого приготування

кулінарні та лікарські рослини. Широко використовується інфрачервоне випромінювання обладнання для сушіння нехарчових продуктів, переважно листових тонкошарові матеріали та лакофарбові покриття у виробництві макарони [3].

Якщо порівнювати традиційні способи сушіння їжі (конвективні та провідні), то фрукти при обробці в інфрачервоній сушарці, після завершення процесу сушіння будуть мати добрі смакові якості, максимально наближені до свіжих продукти харчування; Джерелами інфрачервоного випромінювання є електричні лампи (лампові сушарки) або екрани з газовим обігрівом (газове випромінювання сушарки).

Радіаційні сушарки мають кілька основних переваг: видалення вологи з тонкошарових матеріалів відбувається дуже швидко, вони компактні, легкі в регулюванні, мають незначну втрату тепла в навколишнє середовище. Є й недоліки сушіння інфрачервоним випромінюванням: непридатність для сушіння товстих шарів матеріалу; нерівномірний нагрів висушуваного матеріалу, пов'язаний з швидким нагріванням поверхневого шару, а також повільна передача тепла у внутрішні шари; висока витрата енергії (на 1 кг вологи потрібно від 1,5 до 2,5 кВт-год). Оптимальним рішенням при сушінні товстих шарів матеріалу, зокрема пастоподібних, є використання комбінованих способів сушіння, таких як терморадіаційне і конвективне або терморадіаційне сушіння, або сушіння струмами високої частоти [2].

Мікрохвильовий спосіб сушіння харчових продуктів заснований на впливі на продукт сушіння інтенсивним електромагнітним полем надвисоких частот (НВЧ). Під дією СВЧ полів молекули води починають здійснювати коливальні, а також обертальні рухи, орієнтуючи частоту поля на його електричні лінії. Відбувається повне нагрівання обсягу продукту, при цьому особливо вологі ділянки отримують набагато більше енергії, ніж менш вологі. В результаті цього відбувається видалення вологи в продукті і сушіння продукту. При зниженні вологості продукту сам процес сушіння продукту залишається незмінним, оскільки механізм теплопровідності не відіграє основної ролі [25].

Відмінною особливістю мікрохвильової сушки фруктів і овочів є те, що на сушку витрачається менше часу при відносно низькій температурі під час процесу, що є хорошим способом при сушці харчових продуктів, оскільки при даному способі збереження корисних речовин і вітамінів вище. Основним і, мабуть, єдиним джерелом енергії для генераторів СВЧ-енергії є тільки електроенергія, цей фактор забезпечує виняткову екологічну чистоту. Однак у мікрохвильовому обладнанні є єдине обмеження – відносно низький ККД (60%) при перетворенні енергії електричного струму в енергію СВЧ-поля. Тому виникає необхідність застосовувати мікрохвильове обладнання при низькій вологості продукту (нижче 50%), оскільки це буде більш доцільно.

Під впливом інтенсивного СВЧ-поля відбувається практично повне знищення мікрофлори, що багаторазово збільшує термін зберігання отриманого продукту. Це також називається знезараженням продукту під впливом СВЧ-полів.

Сушка мікрохвильовим випромінюванням овочів і фруктів відрізняється тим, що має високу швидкість і велику ефективність. Відпадає необхідність наявності апаратів для підготовки теплоносія (сушильного агента), немає шкідливих викидів в атмосферу.

В даний час для сушіння фруктів використовують мікрохвильові технології.

Сублімаційний спосіб сушіння продуктів (сублімаційна вакуумна сушка, ліофілізація або випарювання) – обумовлений безпосереднім видаленням вологи з твердої фази. Зі свіжозаморожених продуктів в парову фазу в умовах повного вакууму минаючи рідкий стан. Якщо продукти заморожуються швидко і глибоко, то утворення кристалів льоду в продуктах не таке велике. Це призводить до того, що кристали льоду починають випаровуватися швидше на другому етапі сушіння, при цьому якість отриманого продукту набагато вища. Склад продукції, ступінь подрібнення, особливості її будови та продуктивність впливають на швидкість сублімаційної сушіння. Пюреподібні та рідкі продукти сушаться набагато швидше, ніж тверді продукти. При сублімаційній сушці якість продуктів набагато вища, ніж при простому способі сушіння [2].

Однак сублімаційний спосіб сушіння дорожчий, тому цей спосіб

застосовується в основному для сушіння цінних рослинної сировини, плазми крові, медичних препаратів тощо. Для збереження в продуктах його корисних речовин на тривалі періоди часу, наприклад при виробництві ліків, лікарських екстрактів на основі трав використовується технологія сублімаційної сушки. В даний час даний спосіб є найсучаснішим методом оборотного консервування мікроорганізмів і біопрепаратів, що забезпечує кращу якість продукту, а також високу відновлюваність лактобактерій при тому, що тривалість процесу мінімальна при мінімальних витратах.

При виробництві сушених фруктів вакуумна сублімаційна сушка використовується в основному як засіб для консервації та збереження важливих поживних речовин. При цьому відсутня необхідність застосування ароматизаторів, консервантів і барвників. Головною і основною перевагою вакуумної сушки продуктів є її мала усадка вихідного продукту, а також швидке відновлення сублімованих продуктів при додаванні води.

При акустичному способі сушіння продуктів відбувається вплив на продукт сушіння за допомогою інтенсивних ультразвукових хвиль. Видалення вологи при акустичному способі сушіння з матеріалу відбувається в результаті його опромінення звуком з відповідними певними характеристиками. Акустичний процес сушіння носить циклічний характер. При цьому хвиля витісняє вологу, яка знаходиться на поверхні продукту, після цього залишки вологи розподіляються по капілярах і процес повторюється знову, до досягнення необхідної вологості. Цей спосіб дозволяє сушити продукти сільського господарства, деревину, бавовну, лікарські препарати і трави, продукцію хімічної та інших галузей промисловості [2].

При акустичному способі сушіння волога виводиться з продуктів сушіння в результаті звуку з певними відповідними характеристиками. Головною особливістю даного способу: сушіння в тому, що він протікає без підвищення температури продуктів сушіння, тобто відбувається холодне сушіння. Всі негативні наслідки, що протікають при тепловій сушці в даному способі відсутні. Завдяки цьому акустична сушка – це єдиний спосіб на сьогоднішній день, який придатний

для сушіння матеріалів з високою термочутливістю і окисленням. Акустичні коливальні позитивно позначаються на фізико-хімічних і споживчих властивостях продукту, що обробляється, збільшують сходиність насіння та ін. Акустичний спосіб сушіння вище вакуумного способу в 3 – 4 рази, так як ферменти при даному способі руйнуються вище 40 °С.

## 1.2 Технічні засоби для отримання сушених продуктів рослинного походження

Виробництво сушених продуктів, як правило, здійснюється в основному конвективними сушарками. Конвективне сушіння рослинної сировини проводиться в різних сушильних апаратах, головним чином конвеєрного (стрічкового) і тунельного типу. Конвеєрні сушарки більш досконалі за конструкцією і використанням сушильного агенту, ніж тунельні. Вони знайшли широке застосування для сушіння овочів і плодів, що не виділяють в процесі сушіння сік (насіновеі плоди). Тунельні сушарки через специфіку режиму, що встановлюється в них, добре зарекомендували себе для сушіння плодів, що легко виділяють сік, таких як слива, абрикос та інші кісточкові плоди, а також для винограду.

Простота конструкції, надійність в експлуатації та універсальність зробили тунельні сушарки найбільш поширеними для сушіння фруктів у багатьох країнах світу. Основною особливістю і перевагою тунельних сушарок є наявність власних, вбудованих, теплогенераторів, що працюють на рідкому паливі, що виключає необхідність будівництва котелень [3].

У конструкції тунельних сушарок в даний час застосовується безкалориферне нагрівання повітря як найбільш просте і економічне. Однак, можливий контакт топкових газів з харчовими продуктами погіршує якість оброблюваного продукту. Сушені продукти при тривалому контакті з відпрацьованими газами значною мірою забруднюються частинками продуктів сушильного агенту і при цьому набувають специфічного запаху і смаку. У зв'язку з

цим, якість отриманого продукту повинна оцінюватися відповідно до органолептичних вимог до харчових продуктів.

Тунельна сушарка - це апарат потоково-циклічної дії, де сушіння плодів здійснюється у вагонетках або в лотках, розміщених у вагонетках, які періодично рухаються в робочому каналі сушарки. Режими та процеси сушіння залежать від способу подачі сушильного агенту в робочий простір. За цією ознакою сушарки поділяються на чотири групи: - прямоточні, коли потік сушильного агенту рухається паралельно руху вагонеток з сировиною, де забезпечується максимальна температура теплоносія на вході сировини в робочий простір;

Сушарка може мати кілька зон, де теплоносії циркулює в кожній зоні. Для сушіння плодів більшою мірою використовуються головним чином протитечійні тунельні сушарки [3]. До найбільш поширених видів тунельних сушарок на території СНД можна віднести сушарки фірми «СТ 15x50» (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Схема тунельної сушарки фірми «СТ 15x50»: 1-робочий канал; 2- вагонетка з піддонами; 3- двері вивантаження; 4-психрометр; 5- розподільні шибери; 6-терморегулятор; 7-осьовий вентилятор; 8-привід вентилятора; 9-канал підготовки сушильного агенту; 10- камера спалювання; 11-пальник; 12-бачок для палива; 13-майданчик обслуговування; 14-драбина; 15-шибери подачі свіжого повітря; 16-пульт для приладів; 17-сітка верхніх дверей; 18-шибер для рециркуляції сушильного агенту

### 1.3 Особливості використання сонячної енергії для отримання сушених продуктів рослинного походження

Пристрої, призначені для сушіння вологих матеріалів з використанням сонячної енергії шляхом перетворення її в теплову енергію, можна розділити на дві основні групи: установки з концентруючими пристроями і парникові геліосушарки.

У першій групі установок сонячна радіація до висушуваного матеріалу підводиться з різною кратністю концентрації, що залежить від виду концентруючих пристроїв [3]. Дані типи установок застосовуються при високотемпературних режимах сушіння. До їх основних недоліків можна віднести – високу вартість концентраторів.

Найбільш широке застосування в області сушіння сільгосппродуктів знайшли геліосушарки, засновані на використанні принципу «гарячого ящика» [3, 4]. Залежно від способу енергопідведення до матеріалу, що висушується, вони підрозділяються на - радіаційні, конвективні та комбіновані.

У конвективних геліосушальних установках (КГСУ) висушуваний матеріал сприймає тепло від повітря, нагрітого в геліоповітрянагрівачах. Сонячні радіаційні сушильні установки (СРСУ) являють собою єдиний агрегат, в якому продукт, що висушується, розміщують безпосередньо під впливом сонячної радіації, тобто основна частка енергопостачання до матеріалу здійснюється радіаційним способом. Комбінована геліосушарка (КГС) являє собою поєднання двох типів установок.

На початку тридцятих років минулого століття була побудована сонячна фруктосушальна установка камерного типу. Вона представляла собою витягнуту, по довжині прямокутну кожух-камеру, на одному торці якої була завантажувальна дверцята. Через цей вхід в'їжджали вагонетки з фруктами; на іншому кінці тунелю була встановлена витяжна труба для відведення зволоженого повітря за допомогою вентилятора потужністю 155 Вт. По всій довжині камери був прокладений рейковий шлях. Гаряче повітря для сушіння вироблялося в двох повітрянагрівачах, що представляли собою прості установки оранжерейного типу з подвійним

склінням, розташовані по обидва боки камери і з'єднані з нею трубопроводами. Недоліком даної установки було розшарування теплоносія по поперечному перерізу камери, більш гарячий потік повітря рухався через верхню частину тунелю, і навпаки, холодний потік, по нижній частині верхню частину тунелю, і навпаки, холодний потік, по нижній частині.

У роботі [3] описується сонячна фруктосушильна установка парникового типу, що складається з опорних цегляних стовпів з прогонами, по яких укладені крокви з кутом нахилу  $20^\circ$  до горизонту. Фрукти, що пройшли попередню обробку, розкладаються на решітці з розрахунку 10 кг сирих фруктів на  $1 \text{ м}^2$  поверхні і вводяться під скло, де і відбувається процес сушіння. Одним з основних недоліків цієї конструкції є велика трудомісткість її монтажу та експлуатація установки. У роботі наведені результати досліджень з сушіння плодів і винограду в аналогічній, вищеописаній фруктосушильній установці.

Порівняльний аналіз геліосушарок різних типів [4] показав, що їх використання сприяє значному скороченню часу сушіння в порівнянні з природним сушінням, при одночасно високій якості готової продукції.

У роботі [39] описується невелика комбінована сушарка для овочів і фруктів з додатковим повітронагрівачем. Однак, такі питання, як визначення оптимального режиму експлуатації сонячних фруктосушильних установок і техніко-економічні характеристики пропонованої установки в роботах не розглядалися.

Геліосушарка А.В. Барзунова виконана з прозорої органічної плівки. З метою зменшення теплових втрат нижня частина сушарки покрита алюмінієвим листом. Для поліпшення теплообміну і турбулізації повітря установка виконана за ступінчастою схемою. Геліосушарка оснащена патрубком для подачі повітря і витяжною трубою. Для підвищення продуктивності установки на ній був випробуваний переривчастий спосіб сушіння [4]. Продукція підсушувалася в сушильній камері до 45-50% вологості, потім плоди поміщалися на зберігання під навіс, а через деякий час проводилося його досушування. Підвищення продуктивності установки досягалося шляхом видалення слабоосвітленої вологи на початку сушіння. При цьому на кожен кілограм вологи, що випарувалася,

витрачалося близько 3350 – 4200 кДж тепла, ККД установки становив 55–60%. У міру збільшення енергії зв'язку вологи з продуктом, питома витрата тепла на випаровування 1 кг вологи збільшувалася, і в кінці процесу вона становила 92100–109 000 кДж/кг.

У процесі зберігання підсушеної сировини волога за рахунок градієнта вологості з центральних шарів продукту переміщається до периферії. Зовнішній сухий шар, що утворився в процесі сушіння, знову зволожується за рахунок вологи з центру і тим самим зменшується дифузійний опір. Крім того, в результаті усадки продукту в процесі сушіння, а також збільшення механічної міцності при укладанні для повторного досушування можна збільшити питома навантаження на одиницю площі в 3 – 4 рази.

У роботі [41] наводяться результати випробувань і досліджень щодо створення оптимальних конструкцій геліоповітрянагрівачів для сушіння деяких сільгосппродуктів. Аналіз отриманих результатів показує, що необхідно приділити увагу вивченню температурного режиму роботи сонячних повітрянагрівачів та оптимізації їх розмірів.

В даний час найбільша кількість установок для сушіння зерна, кукурудзи, зелених кормів і сіна з використанням сонячної енергії діє в США, ФРН, Швейцарії, Італії, Франції та інших країнах [4].

Природна циркуляція сушильного агенту дещо обмежує продуктивність конвективних сушарок, оскільки не забезпечує інтенсивного проникнення теплоносієм шару фруктів. Природна циркуляція сушильного агенту дещо обмежує продуктивність конвективних сушарок, оскільки не забезпечує інтенсивного проникнення теплоносієм шару фруктів.

Професор Дагаме [49,50] зібрав відомості з 142 фірм, що займаються геліосушінням. Причому, більшість геліосушарок призначена для сушіння сільгосппродуктів.

Аналіз конструктивних особливостей установок показує, що всі вони переривчастої дії. Це обумовлено вимогою простоти при створенні геліоустановок, в той час як безперервний процес вимагає механізації руху візків з продуктами, що

веде до певного ускладнення конструкції. Абсолютна більша зібрана ним інформація містить такі дані: тип сушарки, наявність сонячних колекторів, паливного дублера, акумулятора тепла, системи для рециркуляції повітря; спосіб циркуляції сушильного агенту.

Економічні та політичні аспекти використання геліосушарок для різних країн мають свої особливості. Так, у країнах, що розвиваються, це обумовлено, перш за все, необхідністю зменшення втрат сільськогосподарської продукції та поліпшення якості продукту, що висушується, що сприяє вирішенню продовольчої проблеми. Сонячна сушка в цих країнах здійснюється за таких характерних умов: - відсутність енергетичного потенціалу для проведення сушіння; - недостатній розвиток сучасних методів зберігання свіжої продукції; - дешева робоча сила в сільському господарстві.

Сонячна сушка продукції в таких країнах конкурує не стільки з сушарками, що мають джерела тепла, які працюють на органічному паливі, скільки з природною сушкою на сонці. Таким чином, використання сонячної сушки в політичному та економічному вираженні в країнах, що розвиваються, полягає не в економії палива, а в непрямому підвищенні врожайності через скорочення втрат.

Навіть, незважаючи на недостатню економічну ефективність сонячних сушарок, їх дослідження і використання вважається капіталовкладенням у майбутнє. У країнах з високим рівнем механізації сільськогосподарського виробництва впровадження сонячних сушарок розглядається в першу чергу як інвестиційна діяльність, економія органічного палива і вирішення екологічних питань. У цих країнах сонячна сушка конкурентоспроможна з традиційними сушарками за таких умов: - продуктивність геліосушарок не нижча, ніж у традиційних; - витрати праці не перевищують витрати на традиційну сушку; - якість продукції не погіршується; - технологічний процес достатньо механізований і надійний.

В даний час головна проблема сушіння сільгосппродуктів - це високі енерговитрати, зниження яких можливе за таких умов: - оптимізація процесу; - розробка більш прогресивних методів сушіння та технічних засобів для їх

здійснення; -заміна дорогих джерел енергії на альтернативні дешеві види, зокрема, на енергію сонця; -оптимізація конструктивних схем геліосушіння.

Аналіз літературних джерел з геліосушіння сільгосппродуктів не дозволяє визначити оптимальні варіанти використання сонячної енергії для сушіння фруктів, дати точні рекомендації щодо методів і техніки геліосушіння різних видів продуктів. Більшість діючих установок є експериментальними з невеликою поверхнею, що сприймає промені, побудовані вони на основі одиничних дослідних даних. На жаль, в даний час немає діючих промислових установок, що пройшли апробацію, що пояснюється відсутністю стандартних методів комплексного аналізу геліосушарок.

Для сушіння сільськогосподарських продуктів, що зазнають складних біохімічні перетворення, необхідно проведення додаткових досліджень, спрямованих на створення раціональних конструкцій геліосушильних установок, характеристики яких відповідали б вимогам виробництва, тобто, відрізнялися простотою і надійністю в експлуатації, мали економічно виправдані показники.

Таким чином, надалі всі зусилля слід спрямувати на поліпшення технології процесу щодо спрощення та здешевлення конструкції геліосушарок, що дозволить їх широке впровадження в агропромислового комплексі. Успішне вирішення цієї не тільки важливої народногосподарської, але і складної науково-технічної проблеми немислимо без систематизації великого різноманіття існуючих способів геліосушіння і різних конструкцій.

Умовна класифікація геліосушарок рослинних сільгосппродуктів надається в спрощеному вигляді, де відображається напрямок і вибір способу сушіння, типу установки, що забезпечує ефективний і якісний процес.

При розробці класифікації геліосушарок в роботі [5] базувалися на трьох основних аспектах – область застосування, технологічний і конструкційний. При виборі підкласу геліосистем в залежності від області застосування основним фактором є обсяг висушуваного продукту. Вибір способу енергопідведення до матеріалу базується на технології сушіння конкретного виду продукту, що забезпечує необхідну якість.

Проведення систематизації та класифікації установок на основі конструктивних особливостей дає можливість врахувати їх особливості та продовжити роботу з їх удосконалення. Це пов'язано з тим, що існує різноманіття плодів і овочів, які необхідно сушити, це і різні вимоги до технології сушіння і вимоги до якості вихідної сировини і кінцевого продукту. До всього цього відносяться і питання технологічності, ергономічності, енергетичні та технічні параметри, а також забезпечення рентабельності виробництва.

Існують сонячні сушарки прямої та непрямой дії сонячної енергії [5].

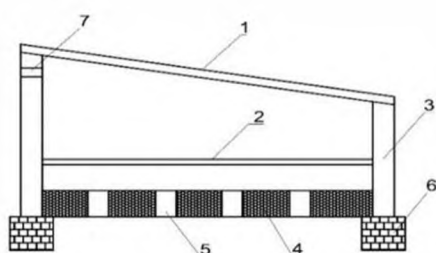


Рисунок 1.2 – Сонячна сушарка з безпосереднім опроміненням вологого матеріалу: 1 - світлопрозора плівка; 2 - стелаж для матеріалу; 3 - стінка; 4 - теплоізоляція; 5 - основа, 7 - отвори; 6 – фундамент

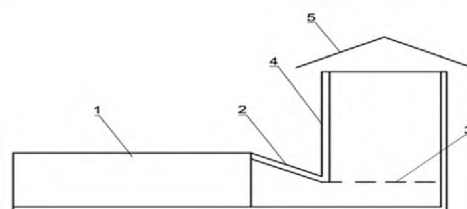


Рисунок 1.3 – Камерна сонячна сушарка з поліетиленовим повітрянагрівачем: 1 - поліетиленовий повітрянагрівач; 2 - повітропровід; 3 - решітка; 4 - сушильна камера; 5 – козирок

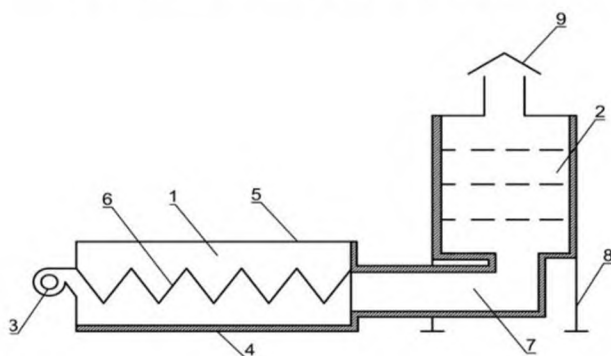


Рисунок 1.4 – Камерна сонячна сушарка з вентилятором і гофрованим абсорбером повітрянагрівача: 1 - повітрянагрівач; 2 - сушильна камера; 3 - вентилятор; 4 – теплоізолюваний корпус; 5 - світлопрозора ізоляція; 6 - абсорбер; 7 - повітропровід; 8 - опора; 9 - кришка - козирок

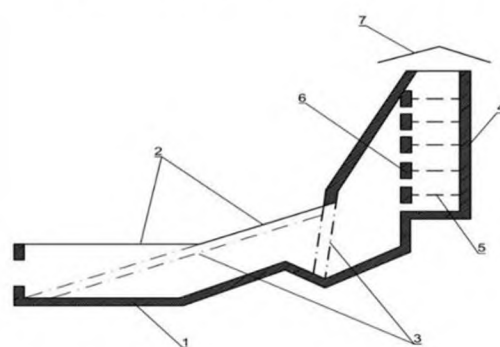


Рисунок 1.5 – Сонячна сушарка з пористим абсорбером повітрянагрівача: 1 - корпус повітрянагрівача; 2 - скління; 3 - пориста насадка, що поглинає промені; 4 - сушильна камера; 5 - решітка для матеріалу; 6 - перегородка; 7 – козирок

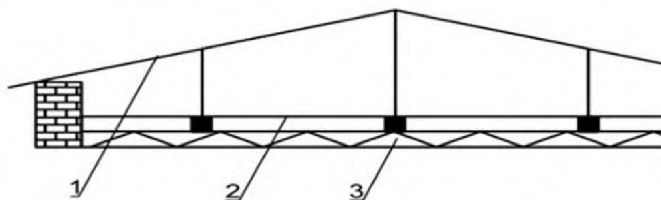


Рисунок 1.6 – Сонячна сушарка з плівки:  
1 - прозора полімерна плівка; 2 - чорна плівка  
на настилі для розміщення продукту;  
3 - теплоізоляція; 4 - бічні стінки

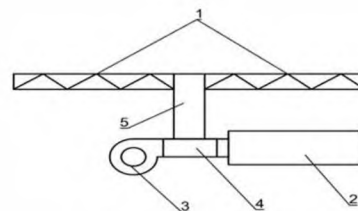


Рисунок 1.7 – Сонячна геліосушарка з  
повітронагрівачем модульного типу:  
1 - модуль повітронагрівача;  
2 - сушильний бункер; 3 - вентилятор;  
4 - повітророзподільник;  
5 - повітропровід

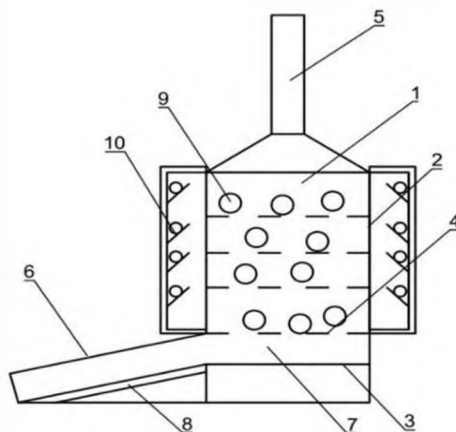


Рисунок 1.8 – Геліосушарка з додатковими нагрівачами: 1 - корпус; 2 – теплоізолюючі  
стілки; 3 - пориста основа; 4 – перфороване дно; 5 – витяжна труба; 6 – сонячний нагрівач;  
7 – піддоновий простір; 8 – акумулятори теплової енергії; 9 – продукти сушіння; 10 –  
додаткові нагрівачі

### Висновки за розділом

1. Сушіння є одним з основних шляхів постачання населення плодоовочевими продуктами в період відсутності свіжих продуктів.
2. Традиційне сушіння фруктів має більш високі витрати технологій і технологічних засобів з використанням рідкого, газоподібного палива та електричної енергії (від 1,5 до 2,5 кВт).
3. Більш перспективним для сушіння є використання сонячної енергії, яка має низькі витрати, якісні показники сушених продуктів овочів і плодів, відноситься до екологічного способу виробництва. Однак має низьку продуктивність.

4. Для підвищення інтенсифікації геліосушарки слід більш глибоке вивчення фізико-механічних і теплофізичних властивостей сировини, вдосконалення процесу сушіння шляхом використання сучасних методів дослідження.

## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ

### 2.1 Процес тепломасообміну в камері геліосушарки

Закономірності перенесення енергії та маси у вологих матеріалах у процесі зневоднення є дуже складними. При розробці нового типу сушильного пристрою слід вивчити закономірності процесу сушіння з оложення з урахуванням конструктивних особливостей для виявлення ефективності сушарки.

Основні теорії сушіння розроблені А.В.Ликовим, П.А.Ребіндером, А.С.Гінзбургом, В.В.Красніковим та іншими видатними вченими [11, 14, 15].

Вологий матеріал, що підлягає сушінню, являє собою багатофазне і багатокомпонентне середовище. Пронизаний сушильний агент проходить складний процес, що супроводжується тепломасопереносом між різними фазами і компонентами системи. Залежно від поставленого завдання ця система вивчається на різних рівнях складності.

Закономірність тепломасообміну в системі «Геліоустановка – вологий матеріал – навколишнє середовище» повинна бути описана відповідними рівняннями, які якісно і кількісно задовольняють реальному процесу.

У загальному випадку фізична модель процесу може бути представлена наступним чином. Сушіння вологого матеріалу відбувається в шарі, який характеризується висотою  $h$  і площею поверхні  $S$ . Шар, що складається з окремих елементів, які характеризуються певним об'ємом  $V_1$ , площею поверхні  $S_1$ , вологості  $w_1$ . Випаровувана волога з матеріалу спочатку надходить у повітряний простір всередині шару, а потім під впливом циркуляції переходить поза межі шару.

Вологий матеріал, що піддається сушінню в геліосушарці, являє собою колоїдне капілярно-пористе тіло, волога в якому пов'язана різними формами зв'язку. Найменш міцним зв'язком володіє волога, що знаходиться в мікропорах і капілярах матеріалу. При її видаленні процес випаровування може бути

розглянутий як випаровування вологи з вільної поверхні води, коли волога знаходиться на рівні поверхні випаровування, тобто збігається з поверхнею тіла. При розрахунку сушильної установки дуже важливим етапом є складання теплового і матеріального балансу.

## 2.1 Опис запропонованої конструкції

На підставі аналітичного огляду та патентного дослідження запропонована конструкція геліосушарки являє собою сушарку шахтного типу, яка включає повітрянагрівальний елемент, сушильну камеру, акумулятор тепла, повітропровід (рис. 2.1).

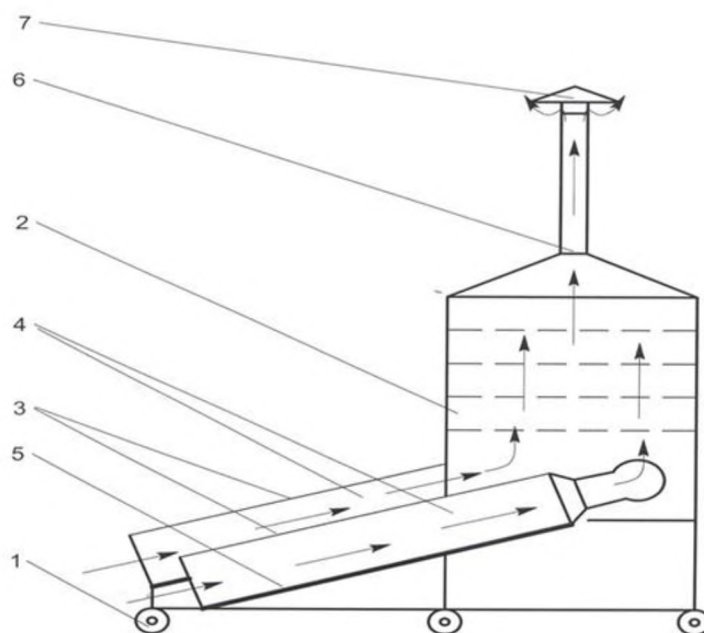


Рисунок 2.1 – Схема запропонованої геліосушарки: 1 – сушильна камера; 2 – вивідне вікно; 3, 4, 6, 8 – патрубків; 5 – кришка; 7 – завихрювач; 9 - решітка; 10 – траєкторії закручених потоків

Сушильний пристрій виконано з можливістю повороту за допомогою опорних коліс 1, розміщених на основі установки. На зовнішній поверхні сушильної камери 2 розміщено покриття, виконане з теплоізоляційного матеріалу. Пропонована установка працює наступним чином. У денний час сонячні промені

проходять через екран 3, через шар парникового захисту, нагрівають повітря в геліоповітронагрівачах сушильної камери 4 і акумулятора тепла 5. Тепле повітря надходить в сушильну камеру 2, де використовується для сушіння сировини, а відпрацьоване повітря надходить в повітропровід 6 і виводиться назовні з-під парасольки 7. Для обґрунтування конструкції сушильної установки відповідними розмірами і параметрами слід їх знайти шляхом розрахунку і обчислення за результатами теоретичних або експериментальних досліджень.

Теоретичне обґрунтування технологічних і конструктивних параметрів сушильного агрегату дозволяє скоротити витрати на експериментальні дослідження і час на проектування.

### 2.3 Матеріальний і тепловий баланс геліосушки для сушіння фруктів

При складанні матеріального балансу визначається кількість видаленої вологи з сухого матеріалу, отриманого в результаті теплової обробки. Також за допомогою матеріального балансу визначається витрата сушильного агента.

При складанні теплового балансу можна визначити питому витрату тепла в сушильній камері на 1 кг випареної вологи, втрати тепла в навколишнє середовище, коефіцієнт корисної дії, витрату енергії на нагрів сушильного агента, а також втрати тепла з сушильним агентом.

У сушильних установках безперервної дії його матеріальний баланс необхідно віднести до одиниці часу ( $\tau = 1 \text{ с}$ ), в той час як тепловий баланс — як до одиниці часу і до одиниці випареної вологи. При розрахунку всього періоду часу сушіння необхідно брати установки на основі періодичної дії.

Окремі втрати як матеріалу, так і сушильного агента, що виникають у процесі сушіння при складанні матеріального балансу, зазвичай не враховуються. Маса готового сушеного матеріалу, а також маса вихідної сировини, що піддається сушінню, пов'язуються рівнянням матеріального балансу.

$$G_1 = G_2 + W, \quad (2.1)$$

де  $W$  – кількість води, видаленої в процесі сушіння, кг/с.

Кількість води, що надходить і виходить з камери сушарки

$$W_1 = \frac{(G_1 \cdot \omega_1)}{100}, \quad W_2 = \frac{(G_2 \cdot \omega_2)}{100}, \quad (2.2)$$

де  $G_1, G_2$  – кількість матеріалу, що надходить і виходить із сушильної камери, кг/с;

$\omega_1, \omega_2$  – вміст води у вихідному та висушеному матеріалі, відносно до загальної маси, %;

$W_1, W_2$  – кількість води, що надходить і виходить із сушильної камери сушарки, кг/с.

$$\omega_1 = \frac{W_1}{G_c + W_1} \cdot 100, \quad \omega_2 = \frac{W_2}{G_c + W_2} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Віднесений до сухої маси вміст води буде мати вираз

$$\omega_c = \frac{W}{G_c} \cdot 100, \quad (2.4)$$

Проводимо розрахунок одного виду вологості на інший

$$\omega_c = \frac{\omega}{100 - \omega} \cdot 100, \quad \omega = \frac{\omega_c}{100 + \omega_c} \cdot 100, \quad (2.5)$$

Випарену воду у відсотковому співвідношенні можна виразити за виразом

$$W = G_1 - G_2 = (G_1 \omega_1 - G_2 \omega_2) / 100, \quad (2.6)$$

Кількість сухої речовини у відсотковому співвідношенні можна визначити за виразом

$$G_c = G_1 \frac{100 - \omega_1}{100} = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100}, \quad (2.7)$$

Після перетворення рівностей (2.6) і (2.7) кількість випареної вологи матиме такий вигляд

$$W = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1}, \quad (2.8)$$

Кількість сухого повітря  $L_B$ , що витрачається в герметичній сушильній камері конвективного типу при одноразовому використанні повітря можна знайти з рівняння балансу вологи, яке виглядає наступним чином

$$L_0 \frac{d_0}{1000} + G_1 \frac{\omega_0}{100} = L_2 \frac{d_2}{1000} + G_2 \frac{\omega_2}{100}, \quad (2.9)$$

Іє  $L_0, L_2$  – кількість вхідного та вихідного повітря з камери сушарки, кг/с; при цьому  $L_0 = L_2 = L$ ,

$d_0 = d_2$  – вміст вологи в сухому повітрі на вході та виході сушильної камери, г/кг.

Перетворивши рівняння (2.9), кількість вологи матиме вигляд

$$W = 0,001(d_2 - d_0) \cdot L = \frac{G_1 \omega_1 - G_2 \omega_2}{100}, \quad (2.10)$$

Виходячи з цього питома витрата повітря на 1 кг випареної вологи визначалися за формулою

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{0,001(d_2 - d_0)}, \quad (2.11)$$

Принципова схема пропонованої конвективної сушарки, що працює виключно за рахунок сонячної енергії, представлена на рисунку 2.2

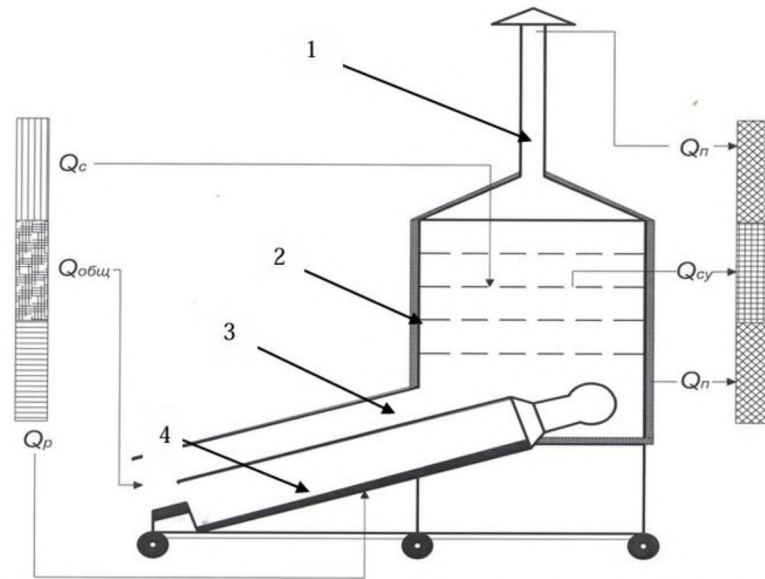


Рисунок 2.2 – Принципова схема сушильної установки для матеріального і теплового балансу: 1-витяжка; 2 – камера; 3 – основний колектор; 4 – додатковий колектор

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{0,001(d_2 - d_0)}, \quad (2.12)$$

Встановлені в аналітичному вигляді означення на схемі теплового балансу буде мати наступне рівняння

$$L_0 I_0 = Q_k + G_2 \cdot c'_M \cdot t'_M + W \cdot c_B \cdot t'_M + G_{mp} \cdot c'_{mp} \cdot t'_{mp} + Q_D = L_2 \cdot I_2 + G_2 \cdot c''_M \cdot t''_M + G_{mp} \cdot c''_{mp} \cdot t''_{mp} + Q_{II}, \quad (2.13)$$

де  $I_0, I_2$  – ентальпії повітря перед колектором та на виході з сушильної камери, кДж/кг сухого повітря;

$Q_k$  – кількість теплоти, підведена в основному колекторі, кДж;

$G_2$  – кількість сухого матеріалу,  $G_2 = G_1 - W$ , кг/с;

$c'_M, c''_M$   $t'_M, t''_M$  – теплоємності матеріалу при температурі на вході та виході із сушильної камери, кДж/(кг·К);

$G_{mp}$  – маса транспортних стелажів, віднесена до одиниці часу, кг/с;

$c'_{mp}, c''_{mp}, t'_{mp}, t''_{mp}$  – маса транспортних стелажів, віднесена до одиниці часу, кг/с;

$Q_D$  – кількість теплоти, підведена в сушильну камеру через додатковий колектор, кДж;

$Q_{II}$  – втрати у навколишнє середовище, кДж;

тепло, що вноситься сировиною та стелажимами ( $Q_c = G_2 \cdot c_{M'} \cdot t_{M'}$ ), кДж;

сумарне тепло, що підводиться ( $Q_{заг} = Q_k + Q_D$ ), кДж.

Зробивши нескладні перетворення і розділивши всі члени рівності (2.13) на  $W$  в кінцевому підсумку отримуємо рівняння теплового балансу, для 1 кг випареної вологи

$$q_D + q_k = l \cdot (I_2 - I_0) + q_M + q_{mp} + q_{II} + c'_B \cdot t'_M, \quad (2.14)$$

де  $q_D, q_k$  – витрата теплоти на 1 кг випареної вологи в основному та додатковому колекторах, кДж/кг;

$q_M + q_{mp} + q_{II}$  – витрати теплоти на нагрівання матеріалу, транспортних стелажів і втрати в довкілля, кВт/кг.

$$q_M = \frac{G_2(c''_M t''_M - c'_M t'_M)}{W}, \quad (2.15)$$

$$q_{II} = \frac{\sum k \Delta t F}{W}, \quad (2.16)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі, кВт/(м<sup>2</sup> К);

$\Delta t$  – температурний напор, град;

$F$  – поверхня огорож певних ділянок, м<sup>2</sup>.

Якщо прийняти допущення, що дорівнює (2.15) як

$$q_M = 0; q_{mp} = 0; q_{II} = 0; q_D = 0; t'_M = 0; \quad (2.17)$$

то

$$q_k = l \cdot (I_1 - I_0) \quad (2.18)$$

Витрата теплоти на підігрів повітря в основному колекторі дорівнюватиме

$$q_k = l \cdot (I_1 - I_0), \quad (2.19)$$

де  $I_1$  ентальпія повітря після колектора.

Прирівнюванням обох прaviх частин рівностей (2.17) та (2.18), отримаємо

$$I_1 = I_2 = I, \quad (2.19)$$

де процес сушіння відбувається з постійною ентальпією. Абсолютно вся теплота, що передається від повітря до матеріалу сушіння, витрачається на випарювання вологи, а вже потім разом з парами повертається в потік повітря (фазовий перехід рідини в пару).

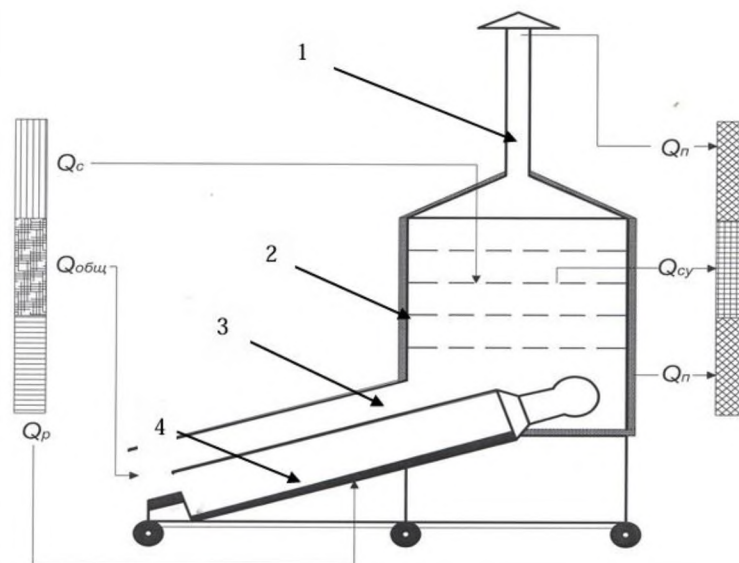


Рисунок 2.3 – Принципова схема сушильної установки для матеріального та теплового балансу 1-витяжка; 2-камера; 3 – основний колектор; 4 – додатковий колектор

У такому процесі як рішення задач може бути використана  $Id$ -діаграма [83]. Процес конвективної сушіння наведено на  $Id$ -діаграмі (рис. 2.3) зображений

лініями АВ - нагрівання повітря в колекторі, ВС - сам процес сушіння при  $I = const$ .

Ентальпія вологого повітря за Іd-діаграмою матиме вигляд

$$I_1 = I_{CB} + 0,001 \cdot d \cdot i_n = c_{CB} \cdot t + 0.001d(1486 + 1.97t), \quad (2.20)$$

де  $c_{CB}$  – теплоємність сухого повітря.

Термічний ККД для конвективної сушарки дорівнює

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{o.c}}, \quad (2.21)$$

де  $t_{o.c}$  – температура навколишнього середовища.

де  $t_1$  і  $t_2$  – температура теплоносія, що приходить і йде, температура навколишнього середовища.

## 2.4 Обґрунтування геометричних параметрів сушарки

Основними геометричними параметрами пропонованої сушарки є висота, площа камери та розміри витяжної шахти. Ці показники впливають на продуктивність сушарки та її ефективність роботи. Оскільки багато параметрів сушарки мають функціональну залежність, слід задавати деякі параметри самим, щоб знайти інші. Розрахунок сушарки ґрунтується на природній вентиляції. Природна вентиляція камери заснована на різниці тиску зовнішнього та внутрішнього повітря. Заданими величинами до виконання розрахунку сушарки можуть служити (рис. 2.4):

- кількість надлишкового явного тепла  $Q$ , кДж/q;
- розрахункова температура зовнішнього повітря за параметрами А в тепловий період  $t_{na}$  °С;
- температура в робочій зоні камери,  $t_{pz}$  °С;

- висота стовпа внутрішнього повітря від середини припливних прорізів до вхідного перерізу шахти  $h_n$ , м;
- висота витяжної шахти  $h_{ш}$ , м.

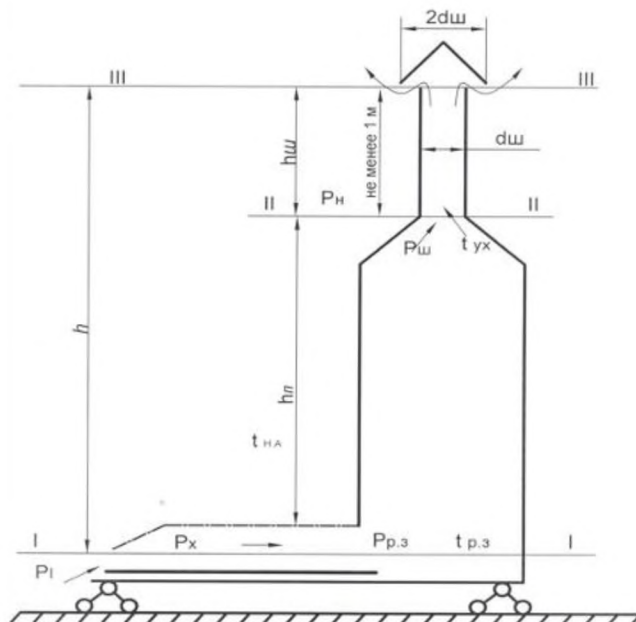


Рисунок 2.4 – Схема для розрахунку природної вентиляції через проточні отвори та витяжну шахту камери

Завданням обґрунтування є визначення площі отворів та перерізу витяжних шахт. Внаслідок зміни по висоті камери сушарки температура повітря, що йде  $t_{xy} > t_{pz}$ .

Для визначення  $t_{xy}$  запишемо кількість тепла, що купується зовнішнім повітрям, що проходить через колектор камери сушіння.

- робочої зони

$$Q_{pz} = (t_{pz} - t_{на})G_n, \quad (2.22)$$

- по кмері сушіння в цілому

$$Q_n = (t_{xy} - t_{на})G_n. \quad (2.23)$$

$$\frac{Q_{pз}}{Q_n} = \frac{t_{pз} - t_{на}}{t_{xy} - t_{на}}. \quad (2.24)$$

З залежності (2.24) визначається температура повітря, що йде з камери сушіння

$$t_{xy} = t_{на} + \frac{t_{pз} - t_{на}}{m_t}, \quad (2.25)$$

Для того щоб вивести закономірності теплового напору повітря, розглянемо спочатку запитану схему сушарки, тобто розглянемо без витяжної шахти у вигляді витяжного отвору (рис. 2.5).

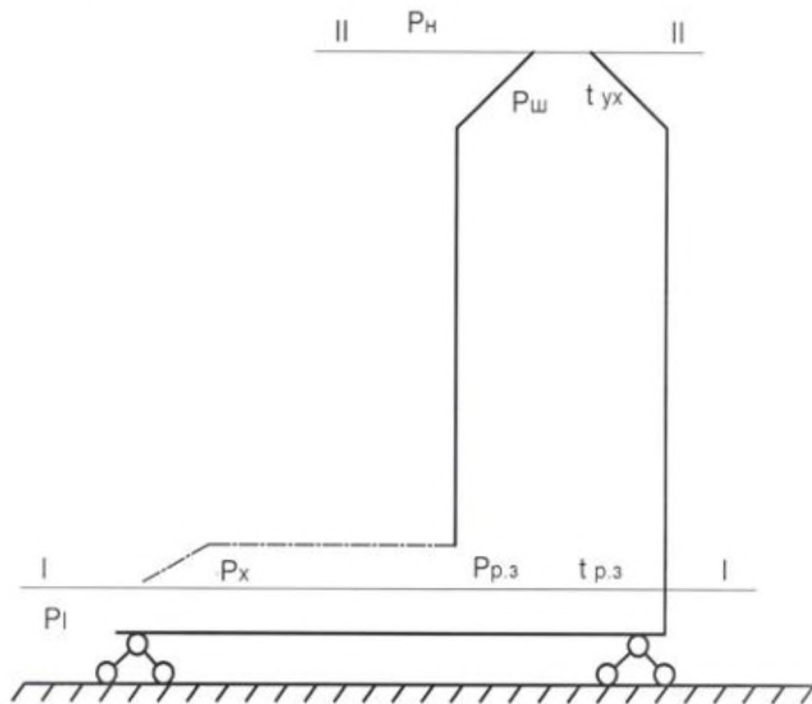


Рисунок 2.5 – Схема сушарки для розрахунку природної вентиляції через припливного бокового та центрального витяжного отворів по тепловому напору

Згідно з представленою схемою сушарки на малюнку 2.5 позначені: тиск повітря в центрі припливних прорізів на рівні I - I через  $P_I$ ; тиск повітря всередині камери на рівні середини вхідної щілини на рівні II-II зовні -  $P_n$  і всередині -  $P_{ш}$ .

Введемо позначення тиску повітря в центрі припливних прорізів на рівні I - I через  $PI$  всередині камери -  $P_x$ . тоді тиск у припливного отвору відповідно виражаються:

- по зовнішній частині

$$P_I = P_n + h_n \rho_n, \quad (2.26)$$

- по внутрішній частині

$$P_I = P_n + h_n \rho_n, \quad (2.27)$$

Різниця тисків припливного отвору визначається як різницю рівностей (3.102) і (3.103)

$$\Delta P_{ПП} = P_I - P_x = P_n + h_n \rho_n - P_x, \quad (2.28)$$

Для витяжного отвору різницю тиску запишемо

$$\Delta P_{ПП} = P_I - P_x = P_n + h_n \rho_n - P_x, \quad (2.29)$$

Для витяжного отвору різницю тиску запишемо так:

$$\Delta P_{вит} = P_{ш} - P_n, \quad (2.30)$$

Загальний перепад тиску (тепловий напір) у сушильній камері дорівнює як сума рівнянь

$$\Delta P_{заг} = \Delta P_{пр} + \Delta P_{вит} = P_H + h_{II} \rho_n - P_x + P_x - h_{II} \rho_{cm} - P_H = (\rho_n - \rho_{cm}) h_{II}, \quad (2.31)$$

Величину теплового напору сушарки з урахуванням витяжної шахти запишемо так

$$\Delta P_{заг.с} = (\rho_n - \rho_{см})h_{II} + (\rho_n - \rho_{yx})h_{III}, \quad (2.31)$$

Кількість припливного повітря для сушіння визначається за рівнянням

$$G_{np} = \frac{Q_{заг}}{t_{xy} - t_{на}}. \quad (2.32)$$

Оскільки припливні та витяжні отвори камери чинять опір потоку повітря, перепади повинні підкорятися наступним умовам:

- у припливному отворі

$$\Delta P_{np} \geq \xi_{np} \frac{v_{np}^2}{2}, \quad (2.33)$$

- у витяжній шахті

$$\Delta P_{np} \geq \xi_{np} \frac{v_{np}^2}{2}, \quad (2.34)$$

З цих виразів визначається значення швидкості потоку повітря:

- у припливному отворі

$$v_{np} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{np}}{\xi_{np} \rho_n}} \quad (2.35)$$

- у витяжній шахті

$$v_{ш} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{ш}}{\rho_{yx} + \frac{\lambda}{d_{ш}} h_{ш}}} \quad (2.36)$$

Використовуючи ці значення швидкості, визначається необхідна площа прорізів камери сушарки за виразами:

$$F_{np} = \frac{G_{np}}{3600 \rho_n \cdot v_{np}}, \quad (2.37)$$

$$F_{\text{выт}} = \frac{G_{\text{пр}}}{3600 \rho_{\text{ух}} \cdot v_{\text{и}}}. \quad (2.38)$$

За одержуваними даними площ отворів залежно від форми перерізу (круглий, прямокутний) визначаються геометричні розміри (діаметр, бічні сторони) перерізу.

Висновки за розділом.

Теоретичний аналіз процесів, що протікають у геліосушарці для сушіння продуктів рослинного походження, дозволив зробити наступні висновки:

1. Розрахункова схема пропонованої геліосушарки (рис 2.1) показує процес сушіння, який інтенсифікується за рахунок подачі в камеру додаткового сушильного агента. Згідно з виконаним розрахунком теплового балансу, коефіцієнт корисної дії геліосушарки підвищується об'ємом підведеного додаткового тепла. Обчислення якого можна оцінити за  $Id$  – діаграмою.

2. Геометричні параметри сушарки засновані на розрахунку природної вентиляції на різниці зовнішнього і внутрішнього повітря (2.33-2.38).

### 3. ПРОГРАМА, МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сушіння фруктів є дуже складним технологічним процесом. При сушінні волога видаляється у вигляді пари або рідини. Сировина піддається до сушіння, у процесі та після теплової обробки змінює свої первісні властивості, причому характер і швидкість цих змін будуть різними для кожного з компонентів (шкірка, м'якоть та насіння), що входять до складу сировини. Закономірності зміни властивостей однорідних капілярно-пористих матеріалів, при їх вологотепловій обробці досить розглянуті в роботах вчених П.А.Ребіндера, А.В.Ликова, А.С.Гінзбурга та інших авторів [6, 7].

Удосконалення та інтенсифікація процесів теплової обробки неможливе без знання властивостей матеріалів, що піддаються сушінню. Відомо, що тільки частина вологи, що видаляється, є вільною, а решта майже до 20% і більше – пов'язаною. Вигляд пов'язаної вологи академік П.А.Ребіндер підрозділив на капілярну, адсорбційну, хімічну та осмотичну. Серед них найбільш міцно пов'язана з речовиною їх хімічна волога.

Якщо для видалення одних видів зв'язаної вологи потрібно лише швидке підведення значної кількості тепла і максимальна поверхня контакту матеріалу, що висушується з теплоносієм, то для інших матеріалів мають відмітну структуру, необхідно певний час для переміщення вологи до поверхні матеріалу і подальшого її випаровування. У цьому роботі видалення вологи, з урахуванням особливості сировини, запропоновано, не високотемпературний конвективний нагрівання, причому пряме потрапляння вивчення виключено збереження якості продукту. Тому управління складними процесами перенесення вологи, теплоти, переміщення водорозчинних мінеральних і органічних речовин неможливо без знання властивостей матеріалу, що піддається обробці, що характеризують назву процесу.

Більшість дослідників, що займалися питаннями теплової обробки та їх підготовкою перед сушінням, відзначають, що енергоємність процесу

термообробки та якість одержуваного продукту в загальному випадку залежать як від фізико-механічних властивостей вихідного матеріалу (обсяг маси плодів, коефіцієнтів тертя), так і від теплофізичних характеристик (теплопровідності, теплоємності). Зазначені характеристики сировини можуть змінюватися в широких межах залежно від стану матеріалу (вологості, температури, щільності, фізико-хімічного складу) [9, 10].

Продукти рослинного походження, зокрема овочі та баштанні культури містять високомолекулярні та білкові речовини, тривалий вплив високих температур на які може призвести до незворотних змін та погіршення якості одержуваного продукту. У зв'язку з цим важливе значення має показник термостійкості матеріалу, що розглядається, що оцінює максимально допустиму температуру і час температурного впливу, при якому не відбувається денатурації (розщеплення) білків [10].

Для обґрунтованого вибору конструкції, технологічного режиму та конструктивних матеріалів, при розробці та виготовленні пристрою для теплової обробки необхідно мати дані про тимчасово-температурні характеристики початку тління та займання продуктів переробки, а також здатність їх до пригорання на поверхнях тепловіддачі. Програмою робіт було передбачено визначення теплофізичних характеристик та фізико-механічних властивостей фруктів, що піддаються тепловій обробці. До теплофізичних властивостей слід віднести коефіцієнти теплоємності, теплопровідності та температуропровідності, а до фізико-механічних властивостей - коефіцієнти тертя. Ці показники змінюються здебільшого від вологості, температури і щільності оброблюваного матеріалу, а коефіцієнти тертя також залежить від виду та обробки матеріалу поверхні тертя.

### 3.1 Щільність досліджуваного матеріалу

У дослідженні визначення щільності матеріалу як експериментальних зразків було використано кілька культур: болгарський перець, баклажан, яблуко і

диня. Щільність досліджуваного матеріалу визначалася за допомогою пікнометричного методу (рис. 3.1) та підраховувалась за формулою

$$\rho_{\phi} = \frac{m_0}{V_2 - V_1}, \quad (3.1)$$

де  $m_0$  - маса зразка, кг;

$V_1$  - об'єм рідини, м<sup>3</sup>;

$V_2$  - обсяг зразка та рідини, м<sup>3</sup>.

Під час проведення дослідів оцінювався вплив вологості та щільності досліджуваного матеріалу на теплофізичні властивості. Вологість вимірювалася в межах до 92,6% при фіксованих температурах досліджуваного матеріалу відповідно 302+1К та 363+2К. З метою наближення процесу до реального, що відбуваються в сушильних установках, для сушіння використовувалися різні партії сировини, попередньо змінені значення вологості. Справжня вологість матеріалу минулого дослідження визначалася за ГОСТ-13496.3-80 шляхом висушування. Обробка результатів дослідів щодо визначення щільності досліджуваного матеріалу проводилася методом математичної статистики [13].

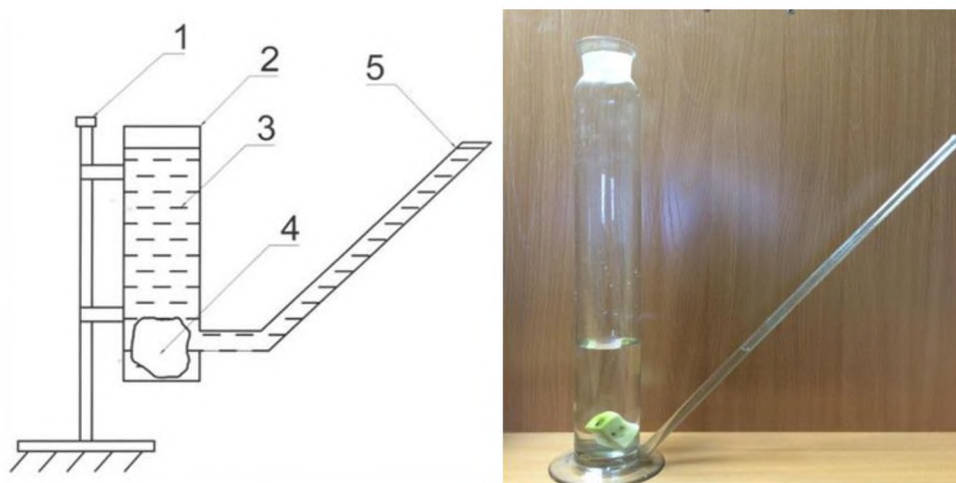


Рисунок 3.1 – Схема та загальний вигляд приладу для визначення щільності:

1 – штатив; 2 – циліндрична ємність; 3 – рідина; 4 – досліджувана сировина;

5 – похила мірна труба

### 3.2 Визначення кутів та коефіцієнтів тертя

Кути тертя по сталевій поверхні без тиску визначалися у спокої та в русі на приладі, схема якого представлена на рис. 3.2. На поверхні сталевого листа 1, що знаходиться в горизонтальному положенні вільно розміщувався досліджуваний матеріал довільної маси. Потім лист в ручну піднімався лебідкою 4 до тих пір, поки досліджуваний матеріал не рухався. Положення листа фіксувалося, і замірявся кут його нахилу, за допомогою секторного механізму 6. При визначенні кутів тертя в русі лист 1 піднімається на фіксований кут і на нього розміщується певна порція досліджуваного матеріалу. У міру збільшення кута нахилу листа 1 фіксувалося положення, при якому досліджуваний матеріал, починав рух без затримки по поверхні тертя. Для достовірної оцінки кутів тертя досліди проводилися п'ятикратної повторності. Температура та вологість досліджуваного матеріалу у всіх дослідах підтримувалася в межах: температура  $302\pm 1\text{K}$ , вологість  $10\pm 2\%$ .

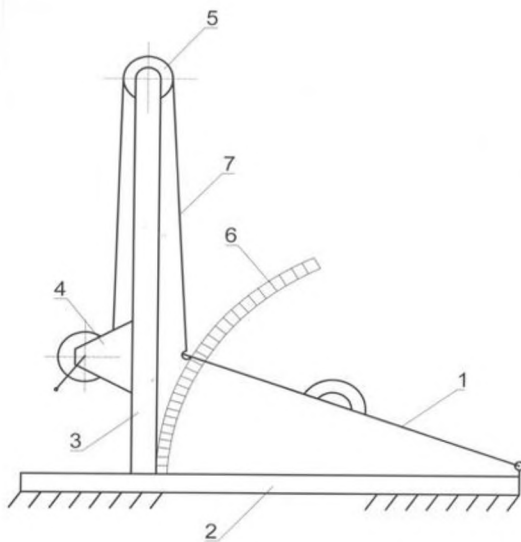


Рисунок 3.2 – Схема та загальний вигляд приладу для визначення кутів природного укосу та тертя сталевій поверхні: 1 – сталевий лист; 2 - горизонтальна станина; 3 – вертикальна опора; 4 – кінцевий блок; 5 – проміжний блок; 6 – секторний механізм; 7 - нитка для приводу сталевий листа

Коефіцієнт тертя від різних факторів (тиску, швидкості, вологості), визначалися на установці, призначеній для визначення коефіцієнта тертя сільськогосподарських матеріалів, в межах від 500 до 1500 Па схема якого представлена на рис. 3.3.

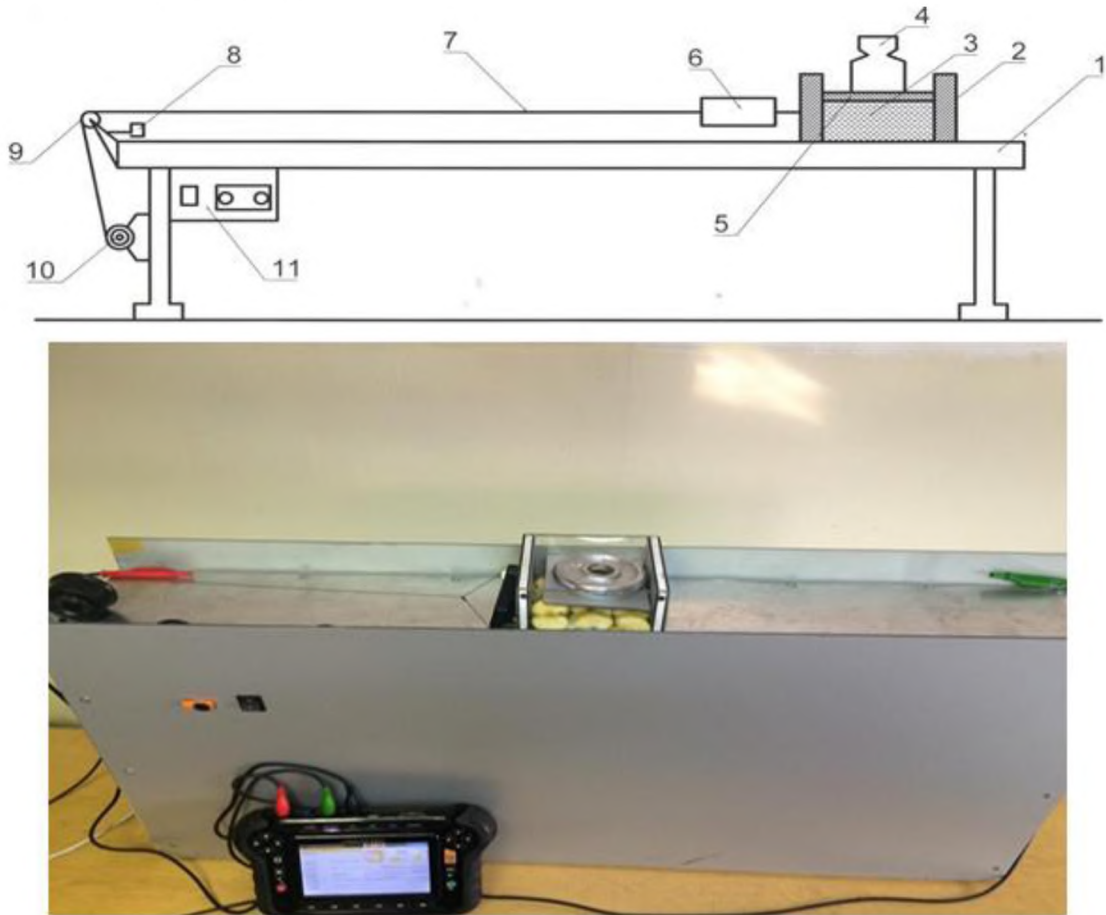


Рисунок 2.3 – Схема та загальний вид установки для визначення коефіцієнтів тертя: 1 – стіл-майданчик; 2 – коробка; 3-досліджувана сировина; 4 – вантаж; 5 – сталевая пластина; 6 – тензодатчик; 7 – трос; 8- кінцевий вимикач; 9 – блок; 10 – мотор-редуктор; 11 – блок управління

Коробка заповнюється досліджуваним матеріалом і рухається від мотора редуктора за допомогою тягової нитки по сталевій пластині. Величина нормального тиску поверхні тертя змінювалася розбором вантажу. Швидкість переміщення коробки здійснювалася шляхом зміни частоти електричного струму з використанням частотного перетворювача, при цьому швидкість змінювалася

починаючи від 0,107 м/с до 0,57 м/с. Зусилля на переміщення коробки з матеріалом, що досліджується, фіксувалося тензометричною системою. При визначенні коефіцієнтів тертя досліджуваного матеріалу по сталевій поверхні спочатку визначалося на переміщення коробки без сировини в момент його зсуву і при русі переміщуваної коробки [69]. Потім коробка заповнюється досліджуваним матеріалом, і знову фіксувався початковий момент зсуву коробки з досліджуваним матеріалом при русі її по сталевій поверхні. Досліди за інших режимів були аналогічними.

Після обробки осцилограм за графіком тарування визначалося справжнє значення зусиль на переміщення досліджуваної сировини.

Коефіцієнти тертя розраховувалися за формулами:

- для статистичних коефіцієнтів тертя

$$f_c = \frac{F_c}{P_c}, \quad (3.2)$$

- для динамічних коефіцієнтів тертя

$$f_d = \frac{F_d}{P_d}, \quad (3.2)$$

де  $f_c$ ,  $f_d$  – відповідно статичний і динамічний коефіцієнт тертя;

$F_c$ ,  $F_d$  – сила тертя в початковий момент зсуву коробки і при русі, що встановився, Н;

$P_c$ ,  $P_d$  – сила нормального тиску, Н.

Вся серія дослідів проводилася в 3-кратній поверхні при значеннях нормального тиску, швидкості переміщення, температури і вологості досліджуваного матеріалу.

### 3.3 Дослідження темпу нагрівання теплоакумулюючих матеріалів

Необхідність використання акумулятора тепла в сонячній сушарці виникає внаслідок постійної потреби теплової енергії для забезпечення інтенсивного процесу сушіння продуктів рослинного походження. Сяйво сонця в момент сушіння може бути не постійним через проходження хмар закривають на час сяйво сонця в результаті цього температура сушильного агента падає. Так як при сяйві сонця надходить більше енергії, ніж необхідно, цю енергію можна накопичити в теплоаккумуляторі а потім використовувати. Для проектування теплового акумулятора важливо враховувати вартість матеріалів, з яких виготовляється акумулятор тепла.

Для проведення дослідження було зібрано лабораторну установку (рисунок 2.4). Установка складається з нагрівального елемента, повітроводу, термодатчиків. У досліджуваному матеріалі цегли та бетону просвердлювалося кілька отворів різної глибини для введення датчика температури. Після встановлення датчиків температури досліджуваний матеріал поміщався в установку і нагрівався протягом 30 хвилин після чого нагрівання припинявся і матеріал охолоджувався природним чином.

Експеримент проводився з триразовою повторністю. Кількість акумульованої теплоти розраховувалася за формулою:

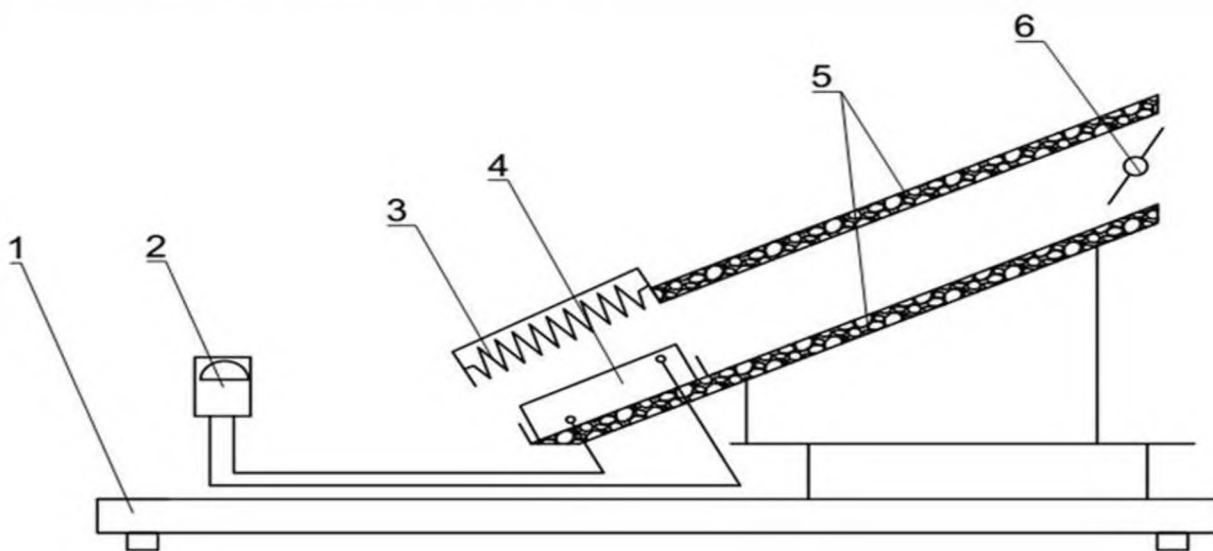




Рисунок 2.4 – Загальний вид установки для дослідження темпу нагрівання

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Дослідження темпу нагрівання теплоакumuлюючих матеріалів

Результати темпу нагрівання охолодження матеріалів товщиною 20 та 50 мм наведено на рисунках 4.1-4.4.

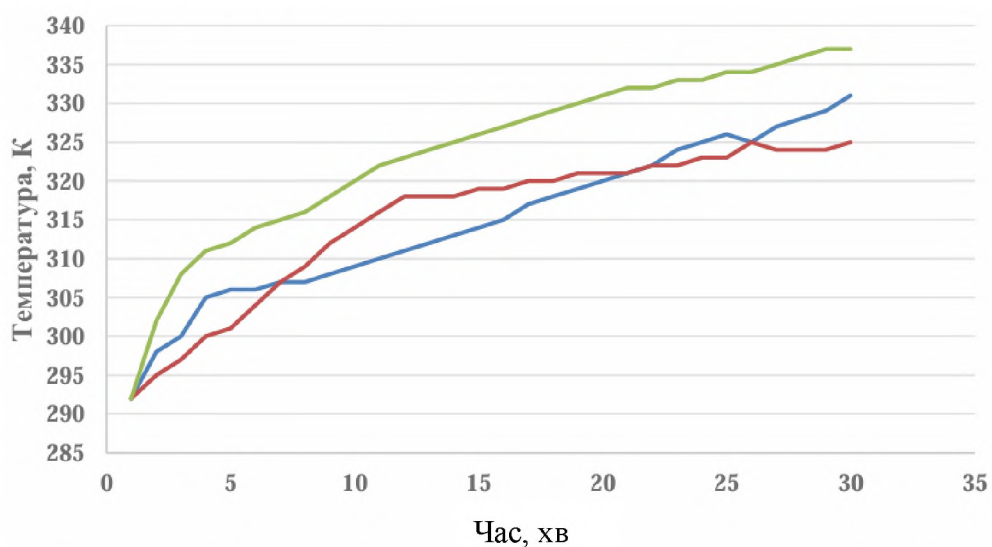


Рисунок 4.1 – Темп нагрівання матеріалів завтовшки 20 мм

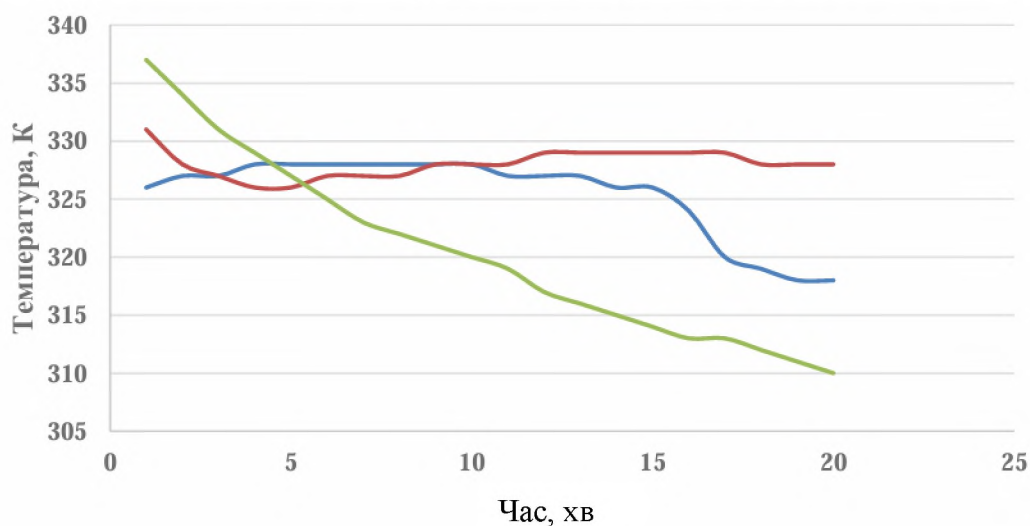


Рисунок 4.2 – Темп охолодження матеріалів завтовшки 20 мм

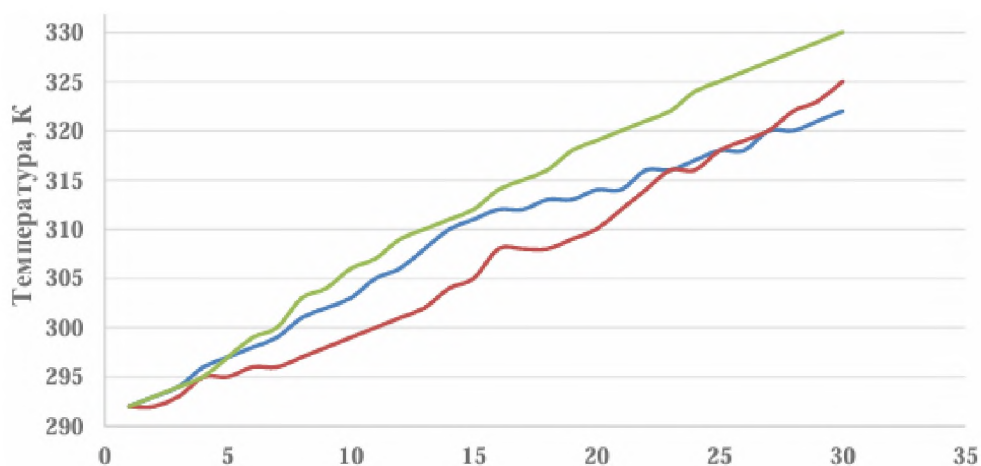


Рисунок 4.3 – Темп нагрівання матеріалів завтовшки 50 мм

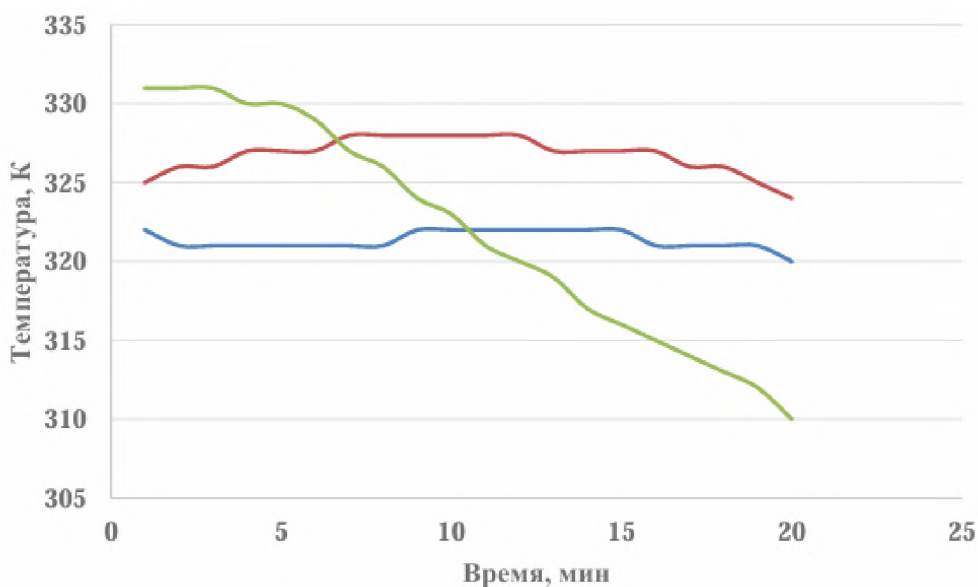


Рисунок 4.4 – Темп охолодження матеріалів товщиною 50 мм

З графіків наведених видно, що швидкість нагріву річкового піску набагато вища ніж у червоної цегли та бетону, проте втрата теплоти у річкового піску відбувається набагато інтенсивніше порівняно з червоною цеглою або бетоном. Червона цегла має кращу здатність утримувати теплоту ніж бетон при товщині 20 – 30 мм, при товщині понад 50 мм темп нагріву бетону трохи вищий. З вище зазначеного випливає, що оптимальним варіантом є система, в конструкції якого сонячний колектор і акумулятор тепла працюють спільно, так як застосування теплового акумулятора як червона цегла може забезпечити

рівномірність сушильного агенту при короткочасній хмарності до 15-20 хвилин.

### Висновки до розділу

За результатами проведених експериментальних можна зробити наступні висновки:

1. При визначенні впливу конструктивних матеріалів на ступінь нагрівання, а також збереження кількості тепла в сонячному колекторі сушарки встановлено, що застосування абсолютно прозорої полімерної плівки товщиною 0,2 мм дозволяє прискорити нагрівання колектора і знизити втрати тепла.
2. З досліджених матеріалів тривале збереження тепла в сонячному колекторі забезпечує червона цегла, яка виконує одночасно роль теплового акумулятора.

## ВИСНОВКИ

У виробництві сушених фруктів застосовуються дуже дороге, енергоємне обладнання. Найбільш раціональний спосіб обробки для цих цілей – використання сонячних сушильних пристроїв, які дозволяють скоротити витрати виробництва та покращити якість продукту. За результатами дослідження було зроблено такі висновки:

1. Встановлено залежність фізико-механічних та теплофізичних властивостей плодів фруктів та овочів від температури, тиску та швидкості переміщення.

2. Значення кутів і коефіцієнтів тертя склали для яблук -  $24^\circ$ , для дині -  $27^\circ$ .

3. Статичні та динамічні коефіцієнти тертя (як зовнішні, так внутрішні) зменшується при підвищенні нормального тиску, та швидкості тертя.

4. Встановлені залежності коефіцієнтів тертя всім досліджуваних матеріалів становило від 0,1 до 0,25. Значення цих коефіцієнтів дозволяє дати рекомендацію щодо швидкості руху лотків при завантаженні стелажів у камеру і при їх складання.

5. Проведений випробувальний експеримент для конвеєрної камери геліосушарки. Встановлено, що при природній витяжці повітря опір камери збільшується і нижні шари одержаних ізоляції показували пасивність зону теплообміну.

6. Запропоновано принципово нову сонячну сушильну установки.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Характеристика сушарок для плодів – Режим доступу: <https://vinograd.info/stati/arhivy/sushka-v-tunnelnyh-sushilkah/tunnelnye-sushilki.html>
2. Дударев І. М. Чипси з рослинної сировини : монографія / І. М. Дударев, О. В. Кузьмін. – Одеса : Олді+, 2023. — 224 с.
3. Способи та технологія сушіння зерна різних культур. AGROEXPERT. URL: <https://agroexpert.ua/sposoby-ta-tekhnohohiia-sushinnia-zerna-riznykh-kultur/>
4. Види зерносушарок. URL: <http://agro-s.com/vidy-zernosushilok>
5. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови: ДСТУ 2240-93. – [Чинний від 1993-09-09]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 74 с.
6. Солоня О.В., Замрій М.А. Дослідження процесу сушіння насінників трав / Вібрації в техніці та технологіях :збірник наукових праць ВНАУ. 2011. №9 (49). С. 186-196.  
URL: <http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/December2022/4xt26FTIEQ1XSX5VD6hh.pdf>
7. Спирін А.В., Твердохліб І.В. Системний підхід до дослідження технологій збирання насінників люцерни. Молодь і технічний прогрес в АПК: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Вінниця, 2019. С. 226-227.
8. Твердохліб І.В. Підвищення ефективності збирання насінників трав. Вісник машинобудування та транспорту. 2017. №2 (6). С. 158-163.
9. Котов Б.І. До питання зниження енергоємності процесів сушіння зерна / Б.І. Котов, В.О. Лісецький // Перспективи розвитку механізації, електрифікації та технічного сервісу сільськогосподарського виробництва: матеріали міжнародної науково-технічна конференція. – Глеваха: ІМЕСГ, ІТС. – 1996. – С. 67.

10. Дідух В.Ф. Науково-технологічні основи механізованого сушіння неоднорідних матеріалів: дис. ... доктора техн. наук: 05.05.11 / Володимир Федорович Дідух. – Луцьк, 2003. – 274 с.
11. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів: монографія / В.Ф. Дідух. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – 165 с.
12. Дударев І.М. Розрахунок машин зі спіральними робочими поверхнями [Текст] : монографія / І. М. Дударев; Луц. нац. техн. ун-т. - Луцьк : Інформ.-вид. від. Луц. НТУ, 2017. – 227 с.
13. Забродоцька Л.Ю. Дослідження та вдосконалення процесу сушіння вороху насіння трав : Монографія / Л.Ю. Забродоцька, Р.В. Кірчук. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2017. – 164 с.
14. Лісецький В.О. Підвищення ефективності сушіння зерна в сушарках періодичної дії: : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11 / Віталій Олександрович Лісецький. – Глеваха, 2003. – С. 18.
15. Станкевич Г.М. Сушіння зерна: підручник / Г.М. Станкевич, Т.В. Страхова, В.І. Анатазевич. – К.: Либідь, 1997. – 352 с.
16. Забродоцька Л.Ю. Енергетичний розрахунок спіральної сушарки / Л.Ю. Забродоцька, С.М. Хомич, Т.В. Пізнюр, О.В. Омельчук // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 43 – Луцьк, 2019.
17. Пат. № 85766 Україна, МПК (2009) F26 B11/00. Барабанна сушарка / Дударев І.М., Кірчук Р. В., Кокалюк Л.Ю.; заявник і власник патенту Луцький державний технічний університет. – № а200706074; заявл. 01.06.2007р.; опубл. 25.02.2009, Бюл. №4.
18. Дударев І.М. Дослідження впливу аеродинамічних параметрів шару гірчиці на процес його вентилявання / І.М. Дударев, С.Є. Голячук, Т.М. Лук'янчук // Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2008. – Вип. 17. – С. 40–45.

## **ДОДАТКИ**

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Назва	К-ть	Примітка
				<u>Документація</u>		
A1			AI.ГСК.15.00.0000.СК	Складальне креслення		
				<u>Складальні одиниці</u>		
		1	AI.ГСК.15.01.0000	Електродвигун приводний	1	
		2	AI.ГСК.15.02.0000	Рама	1	
		3	AI.ГСК.15.03.0000	Редуктор	1	
		4	AI.ГСК.15.04.0000	Муфта МПВП 40х6	1	
				ГОСТ 21424-75		
					1	
				<u>Деталі</u>		
		5	AI.ГСК.15.00.0001	Вал	1	
		6	AI.ГСК.15.00.0002	Кришка	1	
		7	AI.ГСК.15.00.0003	Корпус підшипника	2	
		8	AI.ГСК.15.00.0004	Зірочка ведуча	1	
		9	AI.ГСК.15.00.0005	Кришка	1	
		10	AI.ГСК.15.00.0006	Шків ведучий	1	
		11	AI.ГСК.15.00.0007	Шків ведений	1	
		12	AI.ГСК.15.00.0008	Кожух захисний	1	
		13	AI.ГСК.15.00.0009	Кронштейн	1	
		14	AI.ГСК.15.00.0010	Кронштейн	1	
		15	AI.ГСК.15.00.0015	Болт фундаментний	8	

					AI.ГСК.15.00.0000.СК		
Зм	Арк.	№ докум	Підпис	Дата			
Розробив	Руденко-Сукач				Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірів	Забродоцька						
Н. контр.	Юхимчук				ЛНТУ Каф. AI ім. Г.А.Хайліса зр.AIм-21		
Затверд.	Хомич						

Привод транспортера камери  
сушіння



# **ТЕМА: “ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ФРУКТІВ З ОБҐРУНТУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ГЕЛІОСУШАРКИ”**

**Практична цінність роботи** . На підставі теоретичних і експериментальних досліджень визначено конструктивні та технологічні параметри геліосушарки , що забезпечують інтенсивність процесу сушіння.

**Об’єкт дослідження** – процес сушіння плодоовочевої продукції, властивості матеріалів, що піддаються сушінню, геліосушильна установка з додатковими геліоколекторами і теплоакумуючим пристроєм.

**Предмет дослідження** – закономірність процесів сушіння фруктів з використанням сонячної енергії.

**Мета й завдання роботи.** Інтенсифікація процесу виробництва сушених продуктів рослинного походження з використанням сонячної енергії шляхом застосування додаткових колекторів і теплоакумуючих пристроїв у геліосушарці шахтного типу.

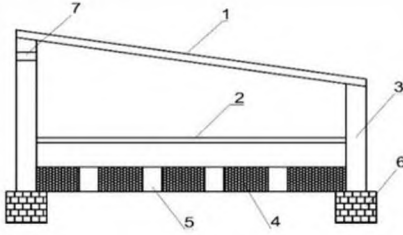
## **Завдання дослідження:**

- вивчити фізико-механічні властивості плодоовочевої сировини та теплофізичні властивості;
- обґрунтувати та розробити більш раціональну геліосушильну установку, здатну забезпечити виробництво сушених продуктів рослинного походження з мінімальними техніко-економічними витратами;
- теоретично та експериментально обґрунтувати основні конструктивні та технологічні параметри геліосушарки.

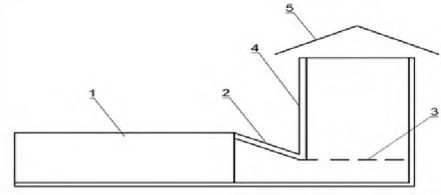
**Методи та способи вирішення поставлених завдань.** У роботі використані загальні та приватні методи. За стандартними методами визначалися: щільність, вологість, витрата та швидкість повітря. Фізико-механічні властивості сировини визначалися методом тензометрії. Теплофізичні властивості визначалися методом регулярного теплового режиму. Дослідження зміни вологості сировини проводилося з використанням теорії планування експерименту.

**Наукова новизна.** Отримано раціональні конструктивні параметри геліосушарки. Виявлено пасивні зони сушильної камери розрахунковим методом. Запропоновано усунення пасивних зон шляхом підведення теплового потоку додатковими геліоколекторами.

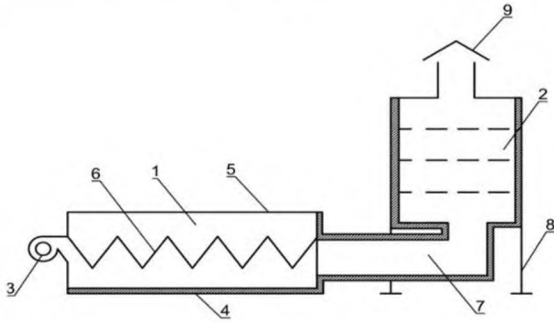
# МАШИНИ АНАЛОГИ



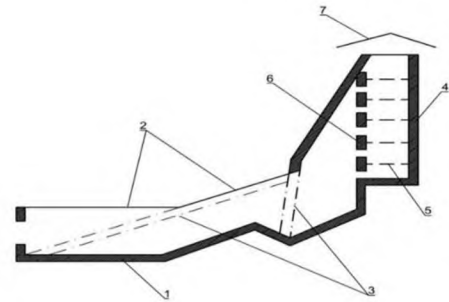
Сонячна сушарка з безпосереднім опроміненням вологого матеріалу: 1 - світлопрозора плівка; 2 - стелаж для матеріалу; 3 - стінка; 4 - теплоізоляція; 5 - основа, 7 - отвори; 6 - фундамент



Камерна сонячна сушарка з поліетиленовим повітрянагрівачем: 1 - поліетиленовий повітрянагрівач; 2 - повітропровід; 3 - решітка; 4 - сушильна камера; 5 - козирок



Камерна сонячна сушарка з вентилятором і гофрованим абсорбером повітрянагрівача: 1 - повітрянагрівач; 2 - сушильна камера; 3 - вентилятор; 4 - теплоізолюваний корпус; 5 - світлопрозора ізоляція; 6 - абсорбер; 7 - повітропровід; 8 - опора; 9 - кришка - козирок



Сонячна сушарка з пористим абсорбером повітрянагрівача: 1 - корпус повітрянагрівача; 2 - скління; 3 - пориста насадка, що поглинає промені; 4 - сушильна камера; 5 - решітка для матеріалу; 6 - перегородка; 7 - козирок

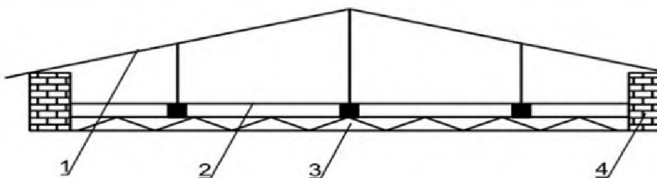


Рисунок 1.6 – Сонячна сушарка з плівки:  
1 - прозора полімерна плівка; 2 - чорна плівка на настилі для розміщення продукту;  
3 - теплоізоляція; 4 - бічні стінки

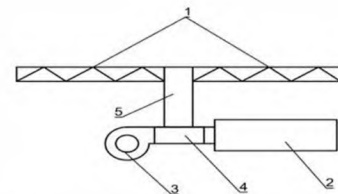
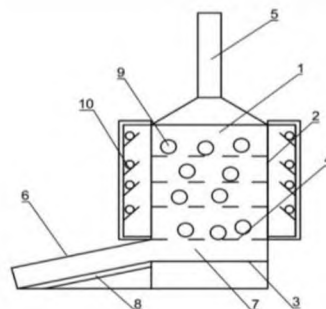


Рисунок 1.7 – Сонячна геліосушарка з повітрянагрівачем модульного типу: 1 - модуль повітрянагрівача; 2 - сушильний бункер; 3 - вентилятор; 4 - повітророзподільник; 5 - повітропровід



Геліосушарка з додатковими нагрівачами:  
1 - корпус; 2 - теплоізолюючі стінки; 3 - пориста основа; 4 - перфороване дно; 5 - витяжна труба; 6 - сонячний нагрівач; 7 - піддоновий простір; 8 - акумулятори теплової енергії; 9 - продукти сушіння; 10 - додаткові нагрівачі

# ЛАБОРАТОРНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

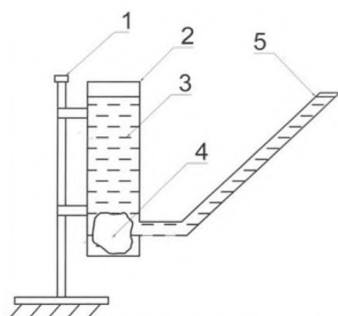


Схема та загальний вигляд приладу для визначення щільності: 1 – штатив; 2 – циліндрична ємність; 3 – рідина; 4 – досліджувана сировина; 5 – похила мірна труба

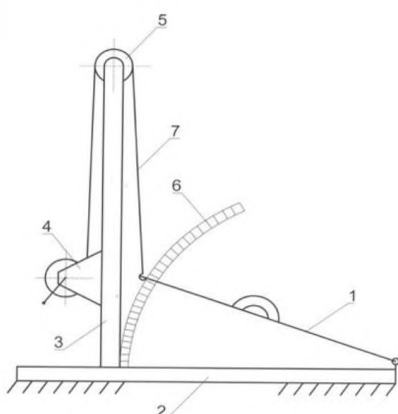


Схема та загальний вигляд приладу для визначення кутів природного укусу та тертя сталевій поверхні: 1 – сталевий лист; 2 - горизонтальна станина; 3 – вертикальна опора; 4 – кінцевий блок; 5 – проміжний блок; 6 – секторний механізм; 7 - нитка для приводу сталевий листа

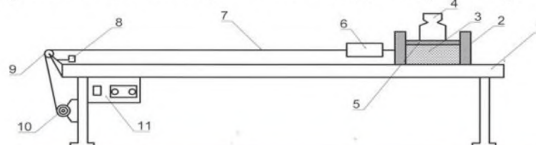
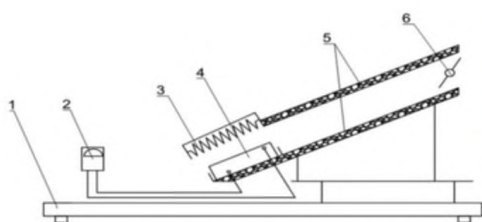
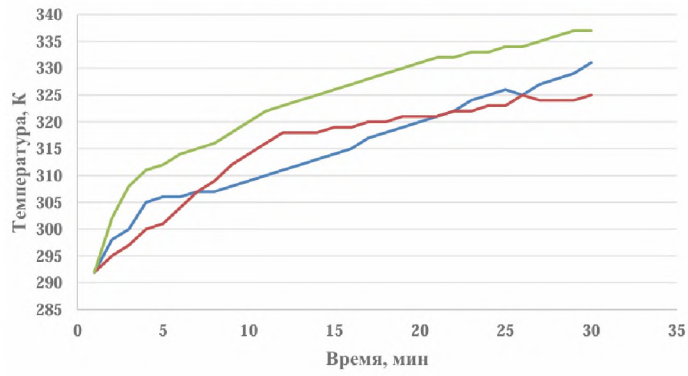


Схема та загальний вид установки для визначення коефіцієнтів тертя: 1 – стіл-майданчик; 2 – коробка; 3-досліджувана сировина; 4 – вантаж; 5 – сталевий пластинка; 6 – тензодатчик; 7 – трос; 8- кінцевий вимикач; 9 – блок; 10 – мотор-редуктор; 11 – блок управління

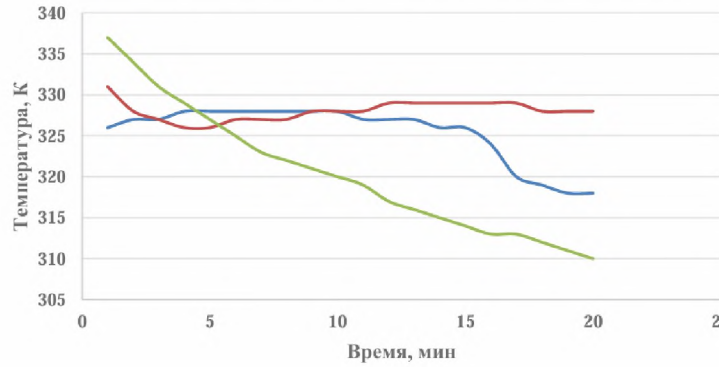


Загальний вид установки для дослідження темпу нагрівання

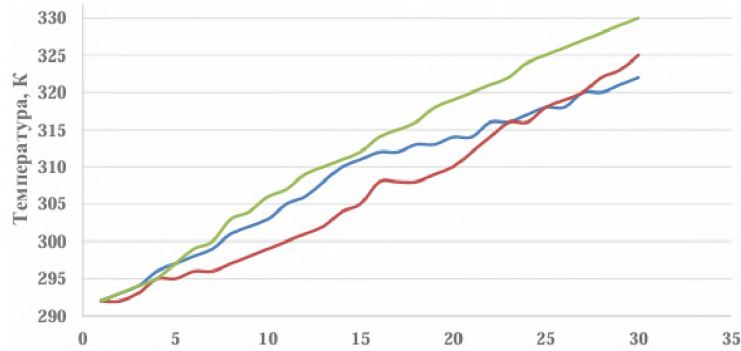
# РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



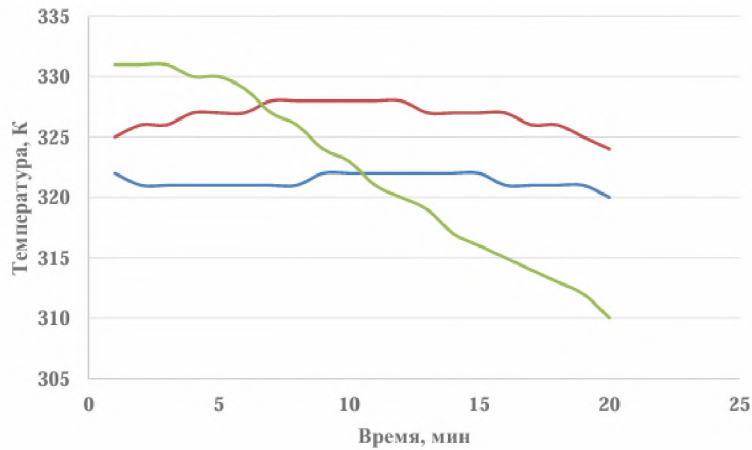
Темп нагрівання матеріалів завтовшки 20 мм



Темп охолодження матеріалів завтовшки 20 мм



Темп нагрівання матеріалів завтовшки 50 мм



Темп охолодження матеріалів товщиною 50 мм

# ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ

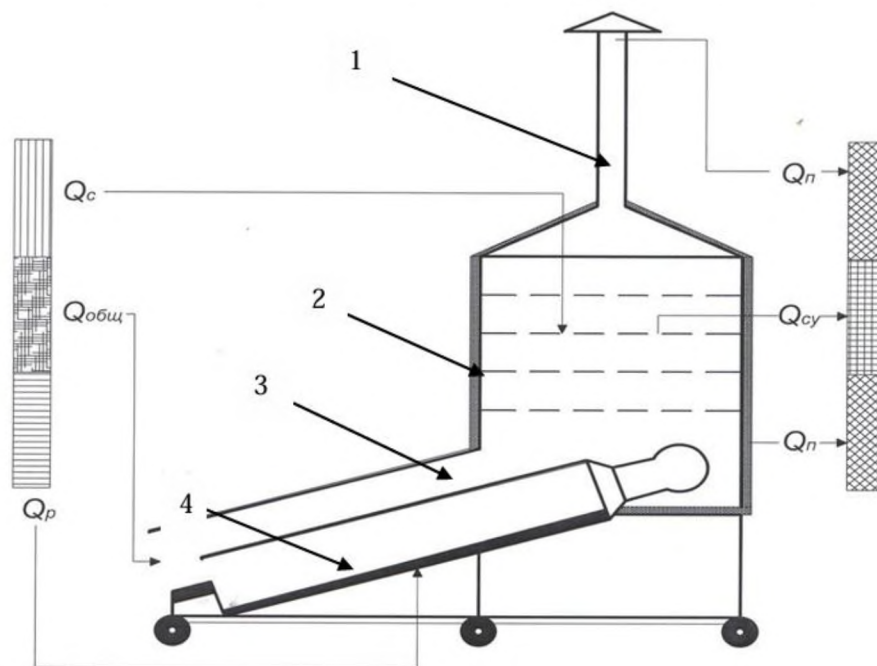


Схема пропонованої геліосушарки: 1 – сушильна камера; 2 – вивідне вікно; 3, 4, 6, 8 – патрубки; 5 – кришка; 7 – завихрювач; 9 - решітка; 10 – траєкторії закручених потоків

Встановлені в аналітичному вигляді означення на схемі теплового балансу буде мати наступне рівняння

$$L_0 I_0 = Q_k + G_2 \cdot c'_M \cdot t'_M + W \cdot c_B \cdot t'_M + G_{mp} \cdot c'_{mp} \cdot t'_{mp} + Q_D = L_2 \cdot I_2 + G_2 \cdot c''_M \cdot t''_M + G_{mp} \cdot c''_{mp} \cdot t''_{mp} + Q_{II} \quad (2.13)$$

де  $I_0, I_2$  – ентальпія повітря перед колектором та на виході з сушильної камери, кДж/кг сухого повітря;

$Q_k$  – кількість теплоти, підведена в основному колекторі, кДж;

$G_2$  – кількість сухого матеріалу,  $G_2 = G_1 - W$ , кг/с;

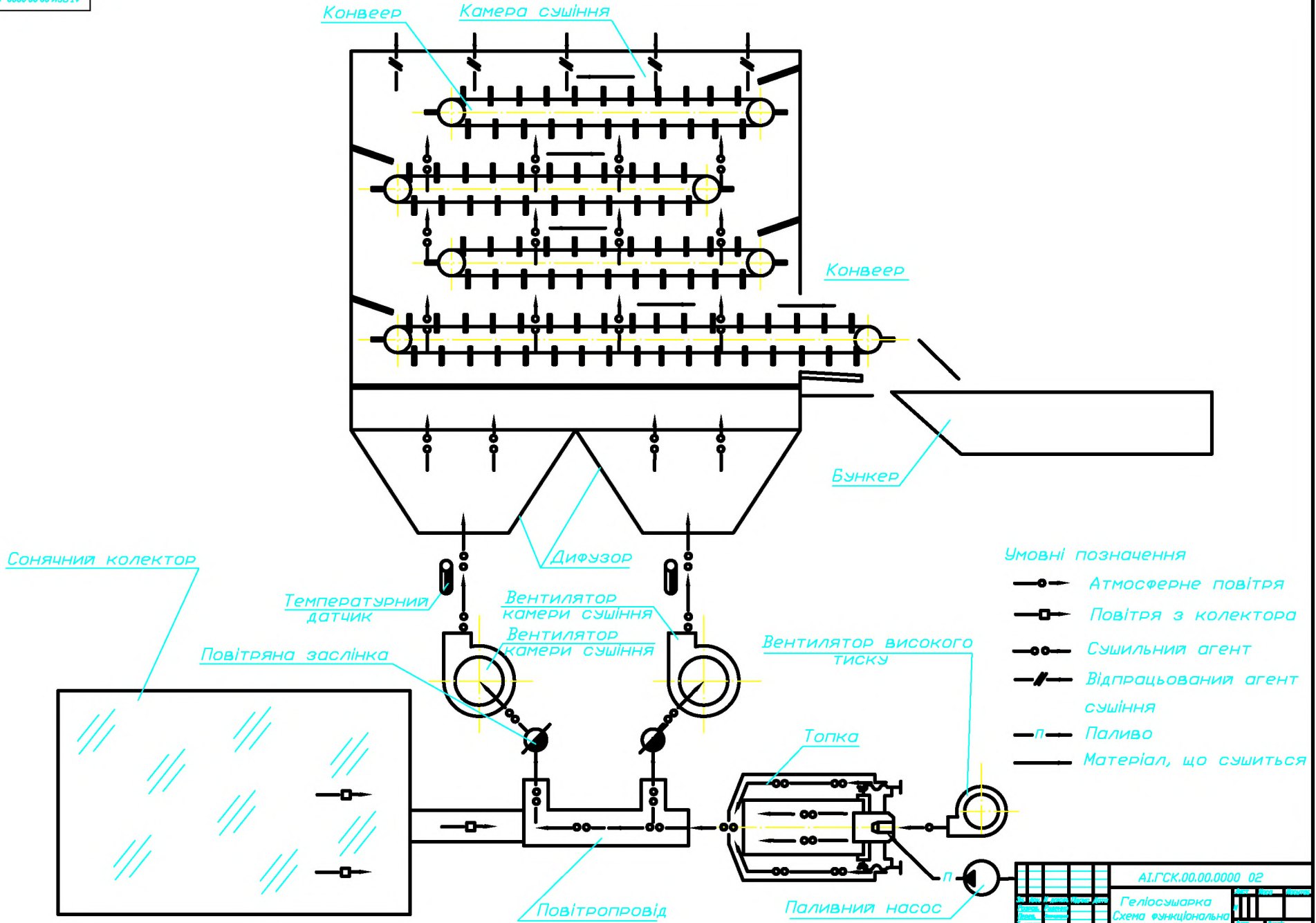
$c'_M, c''_M, t'_M, t''_M$  – теплоємності матеріалу при температурі на вході та виході із сушильної камери, кДж/(кг·К);

$G_{mp}$  – маса транспортних стелажів, віднесена до одиниці часу, кг/с;

$c'_{mp}, c''_{mp}, t'_{mp}, t''_{mp}$  – маса транспортних стелажів, віднесена до одиниці часу, кг/с;

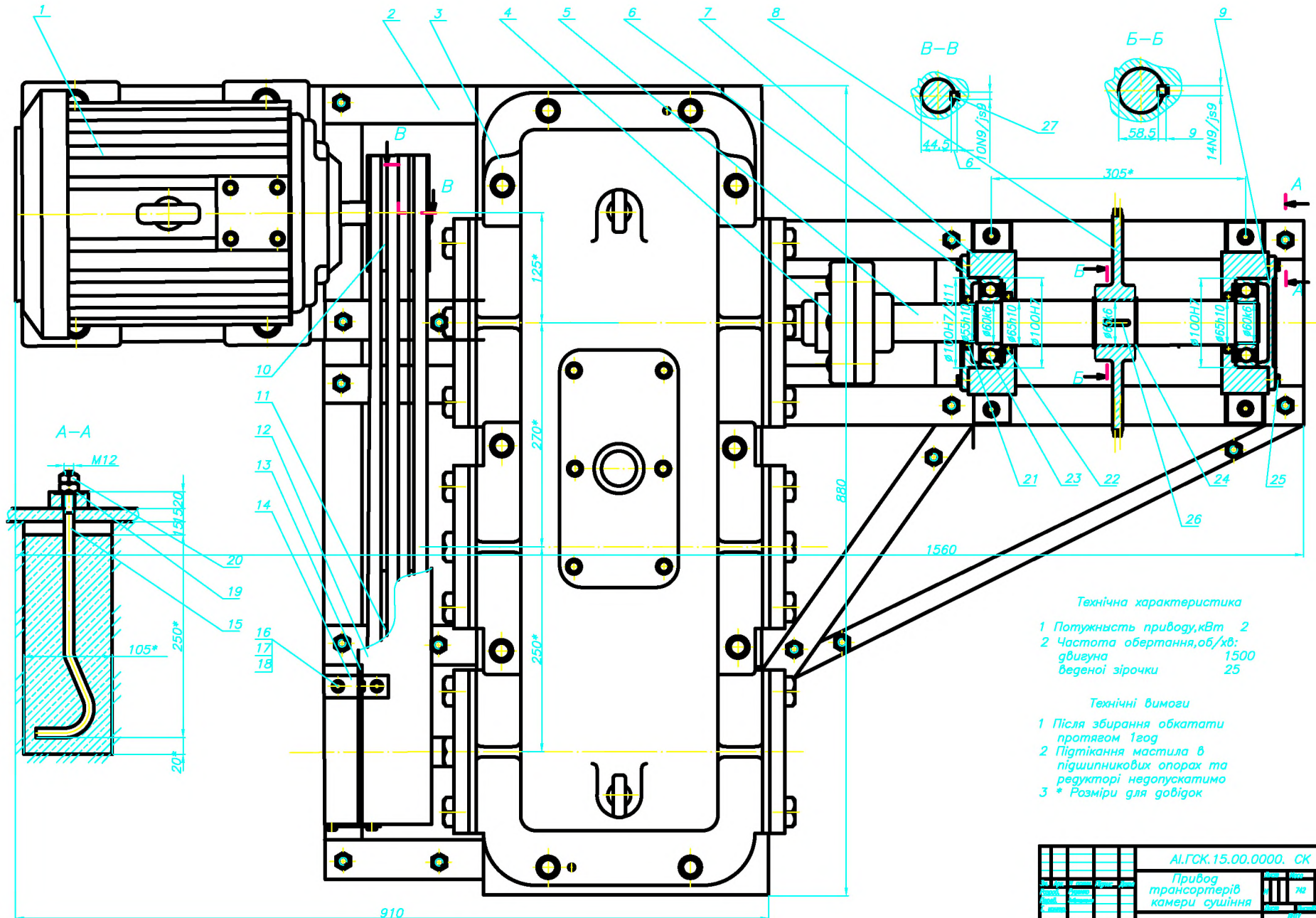
$Q_D$  – кількість теплоти, підведена в сушильну камеру через додатковий колектор, кДж;

$Q_{II}$  – втрати у навколишнє середовище, кДж;



- Умовні позначення
- — Атмосферне повітря
  - — Повітря з колектора
  - — Сушильний агент
  - /— — Відпрацьований агент сушіння
  - п— — Паливо
  - — Матеріал, що сушиться

AI.GSK.00.00.0000 02		№	Дата
№	Вид	№	Дата
Геліосушарка		№	Дата
Схема функціональна		№	Дата
AI.GSK.00.00.0000 02		№	Дата



Технічна характеристика

- 1 Потужність приводу, кВт
- 2 Частота обертання, об/хв:  
двигуна 1500  
веденої зірочки 25

Технічні вимоги

- 1 Після збирання обкатати протягом 1 год
- 2 Підтікання мастила в підшипникових опорах та редукторі недопустимо
- 3 \* Розміри для довідак

АЛГСК.15.00.0000. СК		ЖЗ 1:2	
Привод транспортерів камери сушіння		ЖЗ 1:2	
Кресло		ЖЗ 1:2	
Лист		ЖЗ 1:2	
Монтаж		ЖЗ 1:2	
Технічний		ЖЗ 1:2	
Чертеж		ЖЗ 1:2	
Деталь		ЖЗ 1:2	
Сборка		ЖЗ 1:2	
Контроль		ЖЗ 1:2	
Відп.		ЖЗ 1:2	
Провер.		ЖЗ 1:2	
Утвер.		ЖЗ 1:2	