

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «першого (бакалаврського) рівня»
освітньої програми «Агроінженерія»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

СОНЯЧНА СУШАРКА З ТЕПЛОВИМ АКУМУЛЯТОРОМ ДЛЯ ПЛЮДООВОЧЕВОЇ ПРОДУКЦІЇ

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: к.т.н.
_____ Віктор ДРОЗД

Виконав здобувач першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти заочної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Данило ТАРАСОВ

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання на
відповідне джерело.*

_____ Данило ТАРАСОВ

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти перший (бакалавр)

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ Данило ТАРАСОВ

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Сонячна сушарка з тепловим акумулятором для плодоовочевої продукції»

науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра Костянтин Олександрович

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 187 від « 05 » _____ 09 _____ 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 15 червня 2026 року.

3. **Об'єкт дослідження:** Процес сонячного сушіння плодоовочевої продукції в установці непрямого нагріву з комбінованим тепловим акумулятором (SHS + РСМ) в умовах фермерських та особистих селянських господарств України.

4. **Предмет дослідження:** Теплофізичні, аеродинамічні та кінетичні закономірності процесу сушіння плодоовочевої продукції; конструктивні параметри сонячного колектора, теплового акумулятора та сушильної камери; режимні параметри роботи установки, що забезпечують підвищення енергоефективності та якості готової продукції.

5 Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1 Теоретико-методичний розділ:

Проаналізувати сучасний стан проблеми збереження плодоовочевої продукції та роль сушіння; виконати огляд та класифікацію сонячних сушарок і теплових акумуляторів; проаналізувати існуючі конструкції сонячних сушарок з

тепловими акумуляторами; обґрунтувати вибір конструктивної схеми установки; визначити вимоги до параметрів сушіння плодоовочевої продукції.

5.2 Дослідницько-аналітичний розділ:

Розробити математичну модель теплового балансу плоского сонячного колектора; побудувати математичну модель процесу акумуляції теплової енергії (SHS та PCM); проаналізувати кінетику сушіння плодоовочевої продукції; виконати аеродинамічний розрахунок системи

5.3 Проектно-рекомендаційний розділ:

Виконати інженерний розрахунок основних конструктивних параметрів установки; розрахувати параметри сонячного колектора, теплового акумулятора та сушильної камери; виконати аеродинамічний розрахунок та вибір вентилятора; розробити конструктивну схему та тривимірну модель установки

6.1 До теоретико-методичного розділу: класифікація сонячних сушарок за способом використання енергії, типом циркуляції повітря, конструкцією камери та наявністю акумулятора; огляд конструкцій з SHS та PCM акумуляторами.

6.2 До дослідницько-аналітичного розділу: рівняння теплового балансу колектора (модель Хоттеля-Вілльє-Блісса); система диференціальних рівнянь теплообміну в насадному акумуляторі; метод ентальпії для моделювання PCM; моделі кінетики сушіння.

6.3 До проектно-рекомендаційного розділу: методика інженерного розрахунку сонячних сушарок; довідкові дані щодо теплофізичних властивостей матеріалів

7 Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: тип установки: сонячна сушарка непрямого нагріву з примусовою конвекцією; місткість сушильної камери: 50 кг свіжої продукції; тип продукції: плоди (яблука, банани, хурма), овочі (цибуля, горох, морква, томати, перець); початкова вологість продукції: 75–90%; кінцева вологість продукції: 10–15%; оптимальна температура сушіння: 45–60 °C

9 Дата видачі завдання: « 27 » _____ 09 _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	Лютий 2026	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту кваліфікаційної роботи	Лютий 2026	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи	Березень 2026	0,5	

4.	Написання першого розділу кваліфікаційної роботи	Березень 2026	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Квітень 2026	1,0	
6.	Написання другого розділу кваліфікаційної роботи	Квітень 2026	2,0	
7.	Написання третього розділу кваліфікаційної роботи	Травень 2026	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Травень 2026	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Червень 2026	0,5	
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Червень 2026	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Червень 2026	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	15 червня 2026	0,5	
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Червень 2026	0,5	
14.	Попередній захист на кафедрі	Червень 2026	0,5	
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Червень 2026	0,5	
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 червня 2026	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС бакалавр

_____ Данило ТАРАСОВ

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Дмитро ДОМУЩІ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: 98 сторінок, 28 рисунків, 28 таблиць, 22 джерела за переліком посилань.

Об'єкт дослідження: процес сонячного сушіння плодоовочевої продукції в установці непрямого нагріву з комбінованим тепловим акумулятором (SHS + PCM) для умов фермерських та особистих селянських господарств України.

Мета роботи: підвищення енергоефективності та якості сушіння плодоовочевої продукції шляхом розробки сонячної сушарки з комбінованим тепловим акумулятором, що забезпечує безперервність процесу, стабілізацію температурного режиму та зниження енергозалежності від традиційних енергоносіїв.

Методи дослідження: теоретичні методи тепло- та масообміну (рівняння теплового балансу Хоттеля-Віллє-Блісса, система диференціальних рівнянь нестационарного теплообміну в насадному акумуляторі, метод ентальпії для моделювання фазоперехідних матеріалів); методи математичного моделювання кінетики сушіння; аеродинамічний розрахунок за формулою Ергана; чисельне моделювання методом скінченних об'ємів

Отримані результати: Розроблено комплексну математичну модель теплообмінних процесів у сонячній сушарці з комбінованим тепловим акумулятором; обґрунтовано конструктивну схему установки непрямого нагріву з плоским сонячним колектором площею 3,5 м², комбінованим SHS-PCM акумулятором (1450 кг гальки + 50 кг парафіну) та сушильною камерою місткістю 50 кг; визначено раціональні режимні параметри.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СОНЯЧНА СУШАРКА, ТЕПЛОВИЙ АКУМУЛЯТОР, ФАЗОПЕРЕХІДНИЙ МАТЕРІАЛ (PCM), SHS, ПЛОДООВОЧЕВА ПРОДУКЦІЯ, СУШІННЯ, СОНЯЧНИЙ КОЛЕКТОР.

					14.17 - КР.022.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Тарасов Д.						
Перевір.		Дядюра К. О.					5	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ СУШІННЯ ПЛОДООВОЧЕВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	11
1.1 Сучасний стан проблеми збереження плодовоовочевої продукції та роль сушіння	11
1.2 Сонячні сушарки: класифікація, принципи роботи та перспективи застосування	14
1.3 Теплові акумулятори в сонячних сушарках: призначення, класифікація та фундаментальні засади	16
1.4 Аналіз існуючих конструкцій сонячних сушарок з тепловими акумуляторами.....	20
1.5 Вимоги до параметрів сушіння плодовоовочевої продукції.....	22
Висновки.....	25
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ У СОНЯЧНІЙ СУШАРЦІ З ТЕПЛОВИМ АКУМУЛЯТОРОМ.....	26
2.1 Тепловий баланс плоского сонячного колектора	26
2.2 Математичне моделювання процесу акумуляції теплової енергії	30
2.3 Кінетика сушіння плодовоовочевої продукції	35
2.4 Аеродинамічний розрахунок системи.....	38
2.5 Чисельне моделювання та CFD-аналіз.....	39
2.6 Ексергетичний аналіз сонячної сушарки.....	40
Висновки.....	43

					14.17 - КР.022.0.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Тарасов Д.			ЗМІСТ		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Дядюра К. О.						6	2
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.		Дядюра К. О.							

РОЗДІЛ 3 ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА КОНСТРУКТИВНЕ ПРОЄКТУВАННЯ СОНЯЧНОЇ СУШАРКИ	45
3.1 Вихідні дані та обґрунтування технічних вимог до проєктування	45
3.2 Розрахунок параметрів сонячного колектора	48
3.3 Розрахунок параметрів теплового акумулятора	50
3.4 Розрахунок сушильної камери	53
3.5 Аеродинамічний розрахунок системи та вибір вентилятора.....	56
3.6 Конструктивне проєктування та тривимірне моделювання.....	57
Висновки.....	60
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	61
4.1 Нормативно-правова база охорони праці в сільськогосподарському виробництві	61
4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при роботі з сонячною сушаркою	62
4.3 Засоби колективного та індивідуального захисту	66
4.4 Вимоги безпеки під час експлуатації сонячної сушарки.....	67
4.5 Екологічна безпека використання сонячної сушарки з тепловим акумулятором.....	69
Висновки.....	75
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОЄКТУ.....	76
5.1 Загальні положення	76
5.2 Вихідні дані для розрахунку.....	77
5.3 Методика розрахунку техніко-економічних показників	79
5.4 Розрахунок капітальних витрат.....	82
5.5 Розрахунок річних експлуатаційних витрат.....	84
Висновки.....	92
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96

ВСТУП

Актуальність теми. Післязбиральні втрати плодоовочевої продукції є однією з найгостріших проблем сучасного сільського господарства, що має не лише економічне, а й соціальне та екологічне значення. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), щорічно у світі втрачається приблизно одна третина всієї виробленої їжі, що становить близько 1,3 млрд тонн. Для плодоовочевої продукції ці втрати є особливо критичними — за різними оцінками, від 30 до 50 % зібраних фруктів та овочів не досягають споживача. Основними причинами таких втрат є обмежені терміни зберігання свіжої продукції, недостатність переробних потужностей у регіонах виробництва, недосконалість технологій консервування та транспортування, а також високий рівень пошкоджуваності плодів і овочів при механічному впливі.

В умовах України проблема післязбиральних втрат є особливо актуальною з огляду на значні обсяги виробництва плодоовочевої продукції та обмежені можливості її промислової переробки. Значна частина врожаю в невеликих фермерських та особистих селянських господарствах реалізується у свіжому вигляді на локальних ринках, що призводить до значних втрат у пікові періоди збору врожаю через перевиробництво та відсутність належних умов зберігання. Сушіння є одним із найдавніших, найдоступніших та найефективніших методів консервування, який дозволяє видалити 80–95 % вологи та забезпечити тривале зберігання продукції протягом місяців і навіть років.

Перспективною альтернативою є сонячні сушарки (геліосушарки), які поєднують екологічність, енергоефективність та доступність. Вони забезпечують контрольовані умови сушіння, захист від зовнішніх забруднень та більш стабільну якість готової продукції порівняно з відкритим сонячним сушінням.

					14.17 - КР. 022.0.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Тарасов Д.			ВСТУП			Літ.	Аркуш	Архувів	
Перевір.		Дядюра К. О.								8	3
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Однак основною технічною проблемою сонячних сушарок є переривчастість сонячного випромінювання: у нічний час, а також у хмарну або дощову погоду надходження сонячної енергії припиняється або суттєво знижується, що перериває процес сушіння, подовжує його загальну тривалість та може негативно впливати на якість продукції через цикли нагрівання-охолодження.

Мета і завдання дослідження: Метою кваліфікаційної роботи є підвищення енергоефективності та якості сушіння плодоовочевої продукції шляхом розробки сонячної сушарки з комбінованим тепловим акумулятором, що забезпечує безперервність процесу, стабілізацію температурного режиму та зниження енергозалежності від традиційних енергоносіїв.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан проблеми збереження плодоовочевої продукції, роль сушіння та існуючі конструкції сонячних сушарок з тепловими акумуляторами.

2. Обґрунтувати вибір конструктивної схеми сонячної сушарки непрямого нагріву з комбінованим SHS-PCM тепловим акумулятором.

3. Розробити математичну модель теплового балансу плоского сонячного колектора на основі рівняння Хоттеля-Віллє-Блісса.

4. Проаналізувати кінетику сушіння плодоовочевої продукції та вибрати адекватні математичні моделі.

5. Виконати аеродинамічний розрахунок системи з використанням формули Ергана.

6. Виконати інженерний розрахунок основних конструктивних параметрів установки.

7. Розробити конструктивну схему та тривимірну модель сонячної сушарки.

8. Провести техніко-економічне обґрунтування інноваційного проєкту.

9. Розробити заходи з охорони праці та екологічної безпеки при роботі з установкою.

					14.17 - КР. 022.0.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єкт дослідження – процес сонячного сушіння плодоовочевої продукції в установці непрямого нагріву з комбінованим тепловим акумулятором (SHS + PCM) в умовах фермерських та особистих селянських господарств України.

Предмет дослідження – теплофізичні, аеродинамічні та кінетичні закономірності процесу сушіння плодоовочевої продукції; конструктивні параметри сонячного колектора, теплового акумулятора та сушильної камери; режимні параметри роботи установки, що забезпечують підвищення енергоефективності та якості готової продукції.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використано комплекс сучасних теоретичних, чисельних та експериментальних методів: теоретичні методи тепло- та масообміну: рівняння теплового балансу плоского сонячного колектора (модель Хоттеля-Віллє-Блісса), система диференціальних рівнянь нестационарного теплообміну в насадному акумуляторі, метод ентальпії для моделювання фазоперехідних матеріалів; методи математичного моделювання кінетики сушіння: модель Пейджа, модифікована модель Хендерсона-Пабіса, рівняння Арреніуса для ефективного коефіцієнта дифузії.

Наукова новизна одержаних результатів: вперше розроблено комплексну математичну модель теплообмінних процесів у сонячній сушарці з комбінованим SHS-PCM тепловим акумулятором, яка одночасно враховує тепловий баланс плоского сонячного колектора, нестационарний теплообмін у насадному акумуляторі з твердим матеріалом та фазові переходи в PCM, що дозволяє прогнозувати робочі характеристики установки на етапі проєктування.

Практичне значення одержаних результатів: розроблено конструкцію сонячної сушарки з комбінованим тепловим акумулятором для плодоовочевої продукції, яка може бути виготовлена в умовах майстерень фермерських господарств з доступних матеріалів (галька, парафін, алюмінієвий профіль, скло, мінеральна вата).

					14.17 - КР. 022.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ СУШІННЯ ПЛОДООВОЧЕВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Глобальні масштаби післязбиральних втрат. Післязбиральні втрати плодоовочевої продукції є однією з найгостріших проблем сучасного сільського господарства, що має не лише економічне, але й соціальне та екологічне значення [1]. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), щорічно в світі втрачається приблизно одна третина всієї виробленої їжі, що становить близько 1,3 млрд тонн [2]. Для плодоовочевої продукції ці втрати є особливо критичними — за різними оцінками, від 30 до 50 % зібраних фруктів та овочів не досягають споживача. Основні причини таких втрат — обмежені терміни зберігання свіжої продукції (від кількох днів до кількох тижнів залежно від виду), недостатність переробних потужностей у регіонах виробництва, недосконалість технологій консервування та транспортування, а також високий рівень пошкоджуваності плодів та овочів при механічному впливі [3].

В умовах України проблема післязбиральних втрат є особливо актуальною з огляду на значні обсяги виробництва плодоовочевої продукції та обмежені можливості її промислової переробки. Значна частина врожаю в невеликих фермерських та особистих селянських господарствах реалізується у свіжому вигляді на локальних ринках, що призводить до значних втрат у пікові періоди збору врожаю через перевиробництво та відсутність належних умов зберігання.

					14.17 - КР.022.1.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Тарасов Д.			РОЗДІЛ 1			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.							11	20	
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Сушіння як метод консервування. Сушіння є одним із найдавніших, найефективніших та найдоступніших способів збереження плодоовочевої продукції. Технологічний принцип сушіння полягає у видаленні вологи з продукту до рівня, за якого припиняється життєдіяльність мікроорганізмів та ферментативна активність. Залежно від виду продукції, сушіння дозволяє видалити від 80 до 95 % вологи, знижуючи її вміст з початкових 75–90 % до кінцевих 8–15 %. При такому рівні вологості продукт може зберігатися протягом багатьох місяців або навіть років без втрати основних поживних властивостей, за умови дотримання належних умов зберігання (герметична упаковка, відсутність світла та надмірної вологості).

Сушіння забезпечує збереження значної частини поживних речовин. Хоча водорозчинні вітаміни, особливо вітамін С, можуть частково руйнуватися під час сушіння, мінеральні речовини, харчові волокна та більшість жиророзчинних вітамінів зберігаються добре. При правильно організованому процесі сушіння з дотриманням оптимальних температурних режимів втрати поживних речовин можна мінімізувати.

Традиційне відкрите сонячне сушіння: переваги та недоліки (рисунк 1.1). Традиційне відкрите сонячне сушіння, яке практикується в сільській місцевості протягом століть, має як переваги, так і суттєві недоліки. До переваг належать простота технології, відсутність потреби в спеціалізованому обладнанні та енергоносіях, низька собівартість кінцевого продукту. Однак недоліки цього методу є критичними для забезпечення якості та безпеки продукції:

- *залежність від погодних умов* — дощова або хмарна погода перериває процес сушіння, що може призвести до псування продукції;
- *повільний процес сушіння* — тривалість може сягати кількох діб, що збільшує ризик мікробіологічного псування;
- *ризик забруднення* — продукція відкрита до впливу пилу, комах, птахів, гризунів та мікроорганізмів;
- *нерівномірне видалення вологи* — призводить до нерівномірної якості кінцевого продукту;

					14.17 - КР. 022.1.000 ПЗ	Аркуш
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– *втрата кольору, аромату та поживних речовин* — особливо відчутна через тривалий вплив сонячного ультрафіолетового випромінювання та високих температур;

– *неконтрольовані умови* — неможливість підтримувати оптимальну температуру та вологість.



Рисунок 1.1 – Сучасний стан проблеми збереження плодоовочевої продукції та роль сушіння

Промислові сушарки: ефективність ціною ресурсів. Сучасні промислові сушарки, що використовують електричну енергію, природний газ або інші види викопного палива, забезпечують високу якість продукції, контрольовані умови сушіння та високу продуктивність. Вони дозволяють сушити продукцію цілодобово незалежно від погодних умов, підтримувати оптимальну температуру та швидкість повітряного потоку, забезпечувати гігієнічні умови процесу. Однак такі системи характеризуються значними капітальними та експлуатаційними витратами, високим енергоспоживанням та негативним впливом на довкілля через викиди парникових газів. Для дрібних фермерських та особистих господарств промислове обладнання часто є економічно недоступним.

Сонячні сушарки як компромісне рішення. Сонячні сушарки (геліосушарки) розглядаються як перспективна альтернатива, що поєднує екологічність, енергоефективність та доступність. Вони забезпечують контрольовані умови сушіння, захист від зовнішніх забруднень та більш стабільну якість готової продукції порівняно з відкритим сонячним сушінням. При цьому сонячні сушарки використовують відновлювану енергію, що робить їх екологічно чистими та економічно вигідними в довгостроковій перспективі. Сучасні дослідження спрямовані на підвищення ефективності сонячних сушарок шляхом інтеграції теплових акумуляторів, вдосконалення конструкцій колекторів та застосування автоматизованих систем керування.

1.2 Сонячні сушарки: класифікація, принципи роботи та перспективи застосування

Фундаментальна класифікація сонячних сушарок (рисунок 1.2). Сонячні сушарки класифікуються за низкою ознак, що визначають їх конструкцію, принцип дії та сферу застосування [4].

За способом використання сонячної енергії [5]:

1. *Сушарки прямого нагріву* — продукт безпосередньо поглинає сонячне випромінювання через прозоре покриття (скло або полімерну плівку). Такі системи прості за конструкцією, але мають обмеження щодо максимальної температури та ризик перегріву продукту.

2. *Сушарки непрямого нагріву* — повітря нагрівається в сонячному колекторі та подається в сушильну камеру, де відбувається контакт із продуктом. Цей тип забезпечує більш рівномірне та якісне сушіння, захищає продукт від прямого сонячного випромінювання, що особливо важливо для збереження кольору, поживних речовин та біологічно активних сполук у термочутливих продуктах.

					14.17 - КР. 022.1.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Сушарки змішаного типу — поєднують обидва принципи, коли продукт нагрівається як безпосередньо сонячним випромінюванням, так і підігрітим повітрям від колектора.

ФУНДАМЕНТАЛЬНА КЛАСИФІКАЦІЯ СОНЯЧНИХ СУШАРОК



Рисунок 1.2 – Фундаментальна класифікація сонячних сушарок

За типом циркуляції повітря [6]:

1. *Пасивні (з природною конвекцією)* — рух повітря відбувається за рахунок різниці густин нагрітого та холодного повітря. Такі системи не потребують електроенергії, але мають обмежену продуктивність та чутливі до вітру.

2. *Активні (з примусовою конвекцією)* — використовують вентилятор для примусової подачі повітря. Це дозволяє інтенсифікувати процес сушіння, забезпечити більш рівномірний розподіл температури та вологості, але потребує додаткового енергоживлення (зазвичай від фотоелектричних панелей).

За конструкцією сушальної камери [7]:

- камерні (шафового типу) — найпоширеніший тип для невеликих обсягів продукції;
- тунельні — для безперервного сушіння великих обсягів;
- стрічкові (конвеєрні) — для промислового застосування;

– лоткові — найпростіша конструкція з горизонтальними лотками для продукту.

За наявністю теплового акумулятора [8]:

– без акумулятора — працюють лише в світлий час доби при наявності достатньої сонячної радіації;

– з тепловим акумулятором — акумулюють надлишкове теплову енергію вдень та використовують її вночі або в хмарну погоду, забезпечуючи безперервність процесу сушіння.

Непрямі сонячні сушарки як оптимальний вибір. Найбільшого поширення в наукових дослідженнях та практичних застосуваннях набули сонячні сушарки непрямого нагріву з плоским сонячним колектором. Це зумовлено низкою факторів:

– можливість досягнення більш високих та стабільних температур сушіння (40–70 °C) порівняно з прямими системами;

– захист продукту від прямого ультрафіолетового випромінювання, що зберігає колір, аромат та поживні властивості;

– можливість інтеграції з тепловими акумуляторами різних типів;

– гнучкість конструктивних рішень — від простих саморобних установок до промислових модульних систем.

Огляд літератури показує, що за останнє десятиліття (2015–2025 рр.) було розроблено значну кількість конструкцій непрямих сонячних сушарок для сушіння фруктів, овочів та лікарських трав. Дослідження зосереджені переважно на фруктах та овочах, що сушать при температурі 50–60 °C.

1.3 Теплові акумулятори в сонячних сушарках: призначення, класифікація та фундаментальні засади

Проблема переривчастості сонячного випромінювання. Основною технічною проблемою, що обмежує ефективність та поширення сонячних сушарок, є переривчастість сонячного випромінювання. У нічний час, а також у

					14.17 - КР. 022.1.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хмарну або дощову погоду надходження сонячної енергії припиняється або суттєво знижується, що перериває процес сушіння. Це не лише подовжує загальну тривалість сушіння, але й може негативно впливати на якість продукції через цикли нагрівання-охолодження, що сприяють розвитку мікроорганізмів та нерівномірному видаленню вологи [9].

Роль теплових акумуляторів. Інтеграція теплових акумуляторів (ТА) є науково обґрунтованим та практично ефективним рішенням цієї проблеми. Теплові акумулятори дозволяють акумулювати надлишкове тепло в періоди максимальної сонячної радіації та використовувати його в періоди низької або відсутньої радіації (рисунк 1.3). Це забезпечує [10]:

- безперервність процесу сушіння протягом доби;
- стабілізацію температури в сушильній камері;
- скорочення загальної тривалості сушіння;
- підвищення якості готової продукції;
- зменшення енергозалежності від погодних умов.



Рисунк 1.3 – Теплові акумулятори в сонячних сушарках: призначення, класифікація та фундаментальні засади

Гібридні системи, що поєднують акумуляцію чутливого та прихованого тепла, демонструють синергетичні переваги, включаючи покращення

ефективності сушіння на 10–14,2 %, скорочення термінів окупності до 0,39–1,82 року та покращення якості продукції.

Класифікація теплових акумуляторів за типом акумулюючого матеріалу.
Теплові акумулятори класифікуються за фізичним принципом акумуляції теплової енергії.

Акумулятори з чутливим (явним) теплом (Sensible Heat Storage — SHS).

Акумулятори цього типу накопичують теплову енергію за рахунок підвищення температури матеріалу без зміни його агрегатного стану. Кількість акумульованої енергії пропорційна масі матеріалу, його питомій теплоємності та зміні температури. Основні переваги SHS — простота, надійність, низька вартість та доступність матеріалів.

Галька (річковий камінь) — найпоширеніший та найдешевший матеріал з високою теплоємністю (близько 840–880 Дж/(кг·К)) та густиною 1600–1800 кг/м³. Дослідження підтверджують ефективність використання гальки як твердого акумулюючого матеріалу пористої структури в геліотермічних установках. Чорна галька забезпечує найвищу теплову ефективність — до 49 %. Важливою перевагою гальки є її повсюдна доступність та практично нульова вартість у регіонах з природними водними джерелами.

Мильний камінь (талькохлорит, стеатит) — природний метаморфічний мінерал, що складається переважно з тальку, хлориту та карбонатів. Його унікальні теплофізичні властивості роблять його одним із найефективніших матеріалів для акумуляції тепла:

- надзвичайна теплоємність — накопичує у 2,5 рази більше тепла, ніж цегляна кладка;
- висока щільність — 2900–3100 кг/м³;
- висока теплопровідність, що забезпечує ефективну передачу тепла;
- стійкість до температурних перепадів та хімічна інертність.

Експериментальні дослідження показали, що сонячна сушарка з використанням мильного каменю як теплового акумулятора має термічну ефективність 45 %, ефективність колектора 43 % та ефективність

					14.17 - КР. 022.1.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аккумуляції 74,5 %. Така сушарка забезпечувала роботу протягом 3–4 годин після заходу сонця. Мильний камінь також використовується в теплоакumuлюючих печах, здатних віддавати накопичене тепло протягом 48 годин.

Керамічні кульки та цегла — матеріали з високою теплоємністю, хімічною стабільністю та механічною міцністю. Вони можуть бути використані як альтернатива гальці в регіонах, де природний камінь недоступний.

Пісок — також розглядається як потенційний SHS-матеріал, хоча його теплопровідність та теплоємність дещо нижчі порівняно з галькою.

Акумулятори з прихованим теплом (Latent Heat Storage — LHS) з використанням фазоперехідних матеріалів (Phase Change Materials — PCM)

Акумулятори цього типу накопичують теплову енергію за рахунок зміни агрегатного стану матеріалу (плавлення–кристалізація) при практично постійній температурі. Це забезпечує значно вищу щільність акумуляції енергії порівняно з SHS (у 5–10 разів) та стабільну температуру розрядження. Основними недоліками є вища вартість матеріалів, обмежений термін циклічної роботи та необхідність герметизації.

Парафін — найпоширеніший PCM для сонячних сушарок завдяки:

- температурі плавлення в діапазоні 40–60 °С, що відповідає оптимальним температурам сушіння плодоовочевої продукції;
- високій питомій теплоті плавлення (близько 200 кДж/кг);
- хімічній стабільності та інертності;
- відсутності корозійної активності;
- багаторазовій циклічності без деградації властивостей.

Сучасні дослідження спрямовані на підвищення теплопровідності парафіну шляхом додавання наночастинок (міді, оксиду заліза, графену). Наприклад, використання мідь-нанопідсиленого парафіну в вакуумних трубчастих сонячних колекторах дозволяє збільшити теплову ефективність до 32 % та підтримувати вихід гарячого повітря при 50 °С протягом понад 2 годин.

Солі та гідрати солей — також використовуються як PCM, але мають обмеження через корозійну активність, гістерезис та сублімацію.

					14.17 - КР. 022.1.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняльна характеристика SHS та PCM (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Вибір між SHS та PCM визначається техніко-економічними факторами:

Характеристика	SHS (галька)	PCM (парафін)
Щільність акумуляції енергії	Низька	Висока (у 5–10 разів вища)
Вартість матеріалу	Низька (практично нульова)	Висока
Стабільність температури	Знижується в процесі розрядження	Постійна
Складність конструкції	Проста	Складна (герметизація)
Термін служби	Практично необмежений	Обмежений (цикли)
Доступність	Повсюдна	Обмежена

Гібридні системи, що поєднують SHS та PCM, дозволяють використовувати переваги обох типів: PCM забезпечує стабільну температуру, а SHS — буферну ємність та зниження загальної вартості системи.

1.4 Аналіз існуючих конструкцій сонячних сушарок з тепловими акумуляторами

Сушарка з плоским сонячним колектором та акумулятором з гальки (рисунок 1.4). Це найбільш поширена та досліджена конструкція, що включає плоский сонячний колектор з алюмінієвим абсорбером, пофарбованим у матово-чорний колір для максимального поглинання сонячного випромінювання, та насадний тепловий акумулятор з гальки. Така схема забезпечує ефективне накопичення тепла вдень та його віддавання вночі [13]. Експериментальні дослідження показують, що інтеграція SHS дозволяє збільшити ефективність колектора до 70 % [14]. ККД плоских сонячних колекторів у таких системах

може сягати 52 %, що забезпечує скорочення часу сушіння приблизно на 30 % порівняно з традиційними методами [15].



Рисунок 1.4 – Аналіз існуючих конструкцій сонячних сушарок з тепловим акумулятором

Гібридна сушарка з РСМ та осушувачем. Розроблено гібридну сонячну сушарку з системою акумуляції прихованого тепла та осушуванням, розраховану на завантаження до 50 кг фруктів та овочів. Дослідження показали підвищення ефективності на 3 % порівняно з класичною сушаркою. Інтеграція РСМ у сонячні сушарки забезпечує:

- скорочення часу сушіння до 70,5 % (для овочів, наприклад огірків);
- підвищення термічної ефективності на 10–20 %;
- підтримання температури на 5–20 °C вище навколишнього середовища в періоди відсутності сонця;
- краще збереження поживних речовин — наприклад, вміст вітаміну С в апельсинах зберігається на рівні 7,77 мг порівняно з 5,99 мг при відкритому сонячному сушінні.

Модульна сонячна сушарка з насадним тепловим акумулятором. Проведено параметричний аналіз модульної системи сонячного сушіння з насадним блоком акумуляції тепла. Модульний підхід дозволяє масштабувати систему залежно від потреб користувача та забезпечує гнучкість у виборі конфігурації.

Сонячна сушарка з тепловим насосом. Запропоновано конструкцію сонячної сушарки з тепловим насосом, застосування якого дає змогу збільшити теплопродуктивність установки в 2 рази. Гібридизація сонячних сушарок з тепловими насосами є перспективним напрямом, що дозволяє забезпечити стабільну роботу в будь-яких погодних умовах.

Інноваційні рішення з підвищення ефективності. Сучасні дослідження спрямовані на [11]:

- використання наноматеріалів для підвищення теплопровідності РСМ;
- застосування подвійного скління колекторів для зменшення теплових втрат;
- використання селективних покриттів абсорбера з високим коефіцієнтом поглинання та низькою випромінювальною здатністю;
- впровадження IoT-технологій та AI-керування для оптимізації процесу сушіння;
- використання CFD-моделювання для оптимізації аеродинаміки системи.

1.5 Вимоги до параметрів сушіння плодоовочевої продукції

Температурні режими сушіння (рисунок 1.5). Ефективність сушіння та якість готової продукції значною мірою залежать від дотримання оптимальних температурних режимів. Сонячні сушарки непрямого нагріву забезпечують сушіння при температурі 50–60 °С, що є оптимальним для більшості видів плодоовочевої продукції. Орієнтовні параметри сушіння різних видів продукції наведено в таблиці 1.2.

					14.17 - КР. 022.1.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Оптимальні параметри сушіння плодоовочевої продукції

Вид продукції	Температура сушіння, °С	Початкова вологість, %	Кінцева вологість, %	Рекомендована тривалість, год
Яблука	55–70	80–85	10–15	8–12
Банани	50–60	75–80	10–15	10–16
Хурма	50–60	80–85	10–15	12–18
Цибуля	55–65	85–90	8–12	12–16
Горох	50–60	75–80	10–15	8–12
Морква	55–70	85–90	10–15	10–14
Томати	55–65	90–95	10–12	10–14
Перець	50–60	80–85	10–12	10–14
Гриби	40–50	85–90	10–12	6–10

Вплив температури на якість продукції. Перевищення оптимальної температури сушіння може призвести до:

- надмірного ущільнення поверхневого шару (корочки), що ускладнює випаровування вологи з внутрішніх шарів;
- втрати кольору внаслідок карамелізації цукрів та реакції Майяра;
- руйнування термолабільних вітамінів (особливо вітаміну С та групи В);
- втрати ароматичних сполук;
- зниження відновлювальної здатності сушеного продукту.

З іншого боку, надто низька температура сушіння подовжує процес, збільшує ризик мікробіологічного псування та може призвести до ферментативного потемніння продукту.

Вологість повітря та швидкість потоку. Окрім температури, на ефективність сушіння впливають:

- *відносна вологість повітря* — чим нижча вологість, тим вища рушійна сила масопереносу;

– швидкість повітряного потоку — оптимальна швидкість становить 0,5–2,0 м/с; вищі швидкості можуть призводити до здування продукту та додаткових енергетичних витрат;

– товщина шару продукту — рекомендується 20–50 мм для забезпечення рівномірного сушіння.

Сонячні сушарки з тепловими акумуляторами забезпечують стабільні температурні умови, що сприяє рівномірному видаленню вологи та збереженню кольору, текстури та поживних властивостей продукції. Дослідження показують, що інтеграція TES забезпечує краще збереження поживних речовин, зокрема вітаміну С, порівняно з відкритим сонячним сушінням.



Рисунок 1.4 – Вимоги до параметрів сушіння плодоовочевої продукції

Висновки

1. Післязбиральні втрати плодоовочевої продукції сягають 30–50 % і є критичною проблемою світового сільського господарства. Сушіння є ефективним та доступним способом збереження продукції, що дозволяє видалити 80–95 % вологи та забезпечити тривале зберігання. Сонячні сушарки є перспективною екологічно чистою альтернативою традиційним методам сушіння, що поєднує екологічність, енергоефективність та доступність.

2. Найбільшого поширення набули сонячні сушарки непрямого нагріву з плоским сонячним колектором, які забезпечують сушіння при температурі 50–60 °C та зберігають колір, поживні речовини та біологічно активні сполуки продукції.

3. Основною технічною проблемою сонячних сушарок є переривчастість сонячного випромінювання. Інтеграція теплових акумуляторів є науково обґрунтованим рішенням, що забезпечує безперервність сушіння, стабілізацію температури та підвищення якості продукції.

4. Теплові акумулятори класифікуються на SHS (чутливе тепло) та LHS (приховане тепло з використанням PCM).

5. Аналіз існуючих конструкцій показав доцільність розробки сонячної сушарки непрямого нагріву з плоским сонячним колектором та комбінованим (SHS + PCM) тепловим акумулятором для забезпечення безперервного, енергоефективного та якісного сушіння плодоовочевої продукції в умовах України. Гібридні SHS-PCM системи демонструють синергетичні переваги, включаючи покращення ефективності сушіння на 10–14,2 % та скорочення термінів окупності до 0,39–1,82 року.

6. Подальші дослідження спрямовані на вдосконалення PCM (наномодифікація для підвищення теплопровідності), оптимізацію конструкцій (подвійне скління, селективні покриття) та впровадження інтелектуальних систем керування (IoT, AI).

					14.17 - КР. 022.1.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ У СОНЯЧНІЙ СУШАРЦІ З ТЕПЛОВИМ АКУМУЛЯТОРОМ

Теоретичне обґрунтування процесів, що відбуваються в сонячній сушарці з тепловим акумулятором, базується на фундаментальних законах термодинаміки, тепло- та масообміну. Математичне моделювання є невід'ємним інструментом сучасного проєктування, оскільки дозволяє оптимізувати конструктивні параметри, прогнозувати робочі характеристики та оцінювати ефективність системи на етапі проєктування без проведення дорогих натурних експериментів. Для створення ефективної та надійної конструкції необхідно розробити математичні моделі, які описують теплові, гідродинамічні та кінетичні процеси в основних елементах установки: сонячному колекторі, тепловому акумуляторі та сушильній камері.

2.1 Тепловий баланс плоского сонячного колектора

Загальні засади теплового розрахунку колектора (рисунок 2.1). Плоский сонячний колектор є основним елементом сонячної сушарки непрямого нагріву, оскільки саме в ньому відбувається перетворення сонячного випромінювання на теплову енергію, яка передається повітря-теплоносію. Теплова ефективність колектора визначає загальну продуктивність усієї сушильної установки.

					14.17 - КР.022.2.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Тарасов Д.			РОЗДІЛ 2		Літ.	Аркуш
Перевір.		Дядюра К. О.						Аркушів
Реценз.							26	26
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Для стаціонарного режиму роботи рівняння теплового балансу сонячного колектора має вигляд, згідно з яким корисна теплова енергія, отримана від сонячного випромінювання, дорівнює різниці між поглиненою енергією та тепловими втратами в навколишнє середовище:

$$Q_u = A_c \cdot [G \cdot (\tau\alpha) - U_L \cdot (T_{pm} - T_a)], \quad (2.1)$$

де: A_c – площа поверхні колектора, m^2 ; G – інтенсивність сумарної сонячної радіації на похилу поверхню колектора, $Вт/м^2$; $(\tau\alpha)$ – оптичний ККД колектора (добуток ефективного пропускання скла τ на ефективне поглинання абсорбера α); U_L – сумарний коефіцієнт теплових втрат, $Вт/(м^2 \cdot K)$; T_{pm} – середня температура пластини-абсорбера, K ; T_a – температура навколишнього повітря, K .

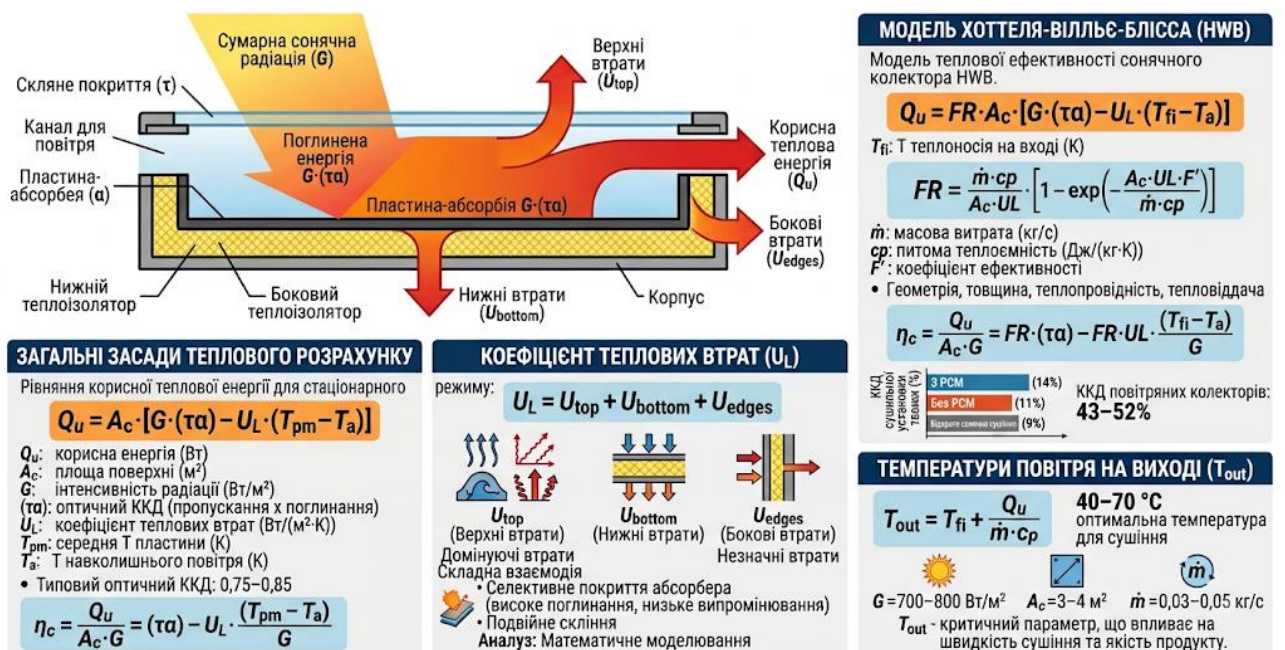


Рисунок 2.1 – Тепловий баланс плоского сонячного колектора

Оптичний ККД $(\tau\alpha)$ залежить від кута падіння сонячних променів, кількості скляних покриттів, коефіцієнта поглинання поверхні абсорбера та оптичних властивостей матеріалів. Для типових плоских колекторів з одним скляним покриттям та селективним покриттям абсорбера значення $(\tau\alpha)$ становить 0,75–0,85. Теплові втрати через нижню та бокові

поверхні зазвичай є менш значними порівняно з верхніми втратами через прозору ізоляцію.

Термічний ККД колектора η_c визначається як відношення корисної теплової потужності до падаючої сонячної енергії:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c \cdot G} = (\tau\alpha) - \frac{U_L \cdot (T_{pm} - T_a)}{G}. \quad (2.2)$$

Модель Хоттеля-Віллє-Блісса. Найбільш поширеною та фундаментальною моделлю для розрахунку теплової ефективності плоских сонячних колекторів є модель Хоттеля-Віллє-Блісса (Hottel-Whillier-Bliss, HWB). Ця модель була розроблена Хоттеллем і Віллє у 1958 році на основі теорії, закладеної Хоттеллем і Вьорцем у 1942 році, і стала основою більшості сучасних моделей колекторів.

Згідно з моделлю HWB, корисна теплова потужність колектора виражається через коефіцієнт відведення тепла F_R , який враховує ефективність теплопередачі від пластини-абсорбера до теплоносія:

$$Q_u = F_R \cdot A_c \cdot [G \cdot (\tau\alpha) - U_L \cdot (T_{fi} - T_a)], \quad (2.3)$$

Де T_{fi} – температура теплоносія на вході в колектор, К.

Коефіцієнт відведення тепла F_R визначається як:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_p}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot c_p} \right) \right], \quad (2.4)$$

де: $\dot{m}$ – масова витрата теплоносія (повітря), кг/с; c_p – питома теплоємність теплоносія при сталому тиску, Дж/(кг·К); F' – ефективність ребра колектора (коефіцієнт ефективності колектора), що враховує термічний опір між пластиною-абсорбером і теплоносієм.

Коефіцієнт ефективності колектора F' залежить від геометричних параметрів колектора (відстань між трубками, товщина пластини, теплопровідність матеріалу) і коефіцієнта тепловіддачі від пластини до повітря.

Термічний ККД колектора в моделі HWB визначається як:

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c \cdot G} = F_R \cdot (\tau\alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{T_{fi} - T_a}{G}. \quad (2.5)$$

Це рівняння є основою для експериментального визначення характеристик колектора та його сертифікації. Для якісних плоских повітряних колекторів термічний ККД може сягати 43–52 %. Експериментальні дослідження показують, що інтеграція систем акумуляції тепла з використанням фазоперехідних матеріалів дозволяє підвищити ефективність колектора. Зокрема, теплова ефективність сонячної сушарки з РСМ становила 14 % порівняно з 11 % без РСМ та 9 % при відкритому сонячному сушінні.

Коефіцієнт теплових втрат. Сумарний коефіцієнт теплових втрат U_L складається з трьох основних компонентів:

$$U_L = U_{top} + U_{bottom} + U_{edges}, \quad (2.6)$$

де: U_{top} – коефіцієнт втрат через верхнє прозоре покриття (скло), зумовлений конвекцією та випромінюванням; U_{bottom} – коефіцієнт втрат через нижню ізоляцію; U_{edges} – коефіцієнт втрат через бокові стінки (зазвичай незначний).

Верхні теплові втрати є домінуючими і визначаються складною взаємодією конвективних та радіаційних процесів між абсорбером, склом і навколишнім середовищем. Для зменшення верхніх втрат використовують селективні покриття з високим коефіцієнтом поглинання в сонячному спектрі та низькою випромінювальною здатністю в інфрачервоному діапазоні, а також подвійне скління. Математичне моделювання дозволяє аналізувати теплові втрати, зумовлені механізмами конвекції та радіації, та оптимізувати компоновку колектора.

Температура повітря на виході з колектора. Температура повітря на виході з колектора T_{out} визначається з рівняння теплового балансу для потоку теплоносія:

$$T_{out} = T_{fi} + \frac{Q_u}{\dot{m} \cdot c_p}. \quad (2.7)$$

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для сонячних сушарок непрямого нагріву температура повітря на виході з колектора має становити 40–70 °С залежно від виду продукції. При інтенсивності сонячної радіації 700–800 Вт/м² та площі колектора 3–4 м² ця температура досягається при витраті повітря 0,03–0,05 кг/с. Дослідження показують, що температура повітря на виході з колектора є критичним параметром, який впливає на швидкість сушіння та якість кінцевого продукту.

2.2 Математичне моделювання процесу акумуляції теплової енергії

Загальні принципи моделювання теплових акумуляторів. Тепловий акумулятор є ключовим елементом сонячної сушарки, що забезпечує безперервність роботи в періоди відсутності сонячного випромінювання. Інтеграція теплових акумуляторів дозволяє підвищити ефективність системи шляхом продовження роботи за межі пікових сонячних годин. Математичне моделювання процесів акумуляції та розрядження теплової енергії дозволяє визначити оптимальні параметри акумулятора (масу, об'єм, геометрію, матеріал) та прогнозувати його робочі характеристики.

Залежно від типу теплоакumuлюючого матеріалу (SHS або PCM), математичні моделі суттєво відрізняються. Для SHS-матеріалів (галька, мильний камінь) використовуються моделі теплообміну в пористому середовищі, а для PCM — моделі з фазовим переходом з використанням методу ентальпії. Сучасні дослідження пропонують комплексні математичні моделі, які охоплюють три основні етапи: сонячний колектор, тепловий акумулятор та сушильну камеру.

Акумуляція в твердому матеріалі (SHS). Кількість акумульованої теплової енергії. Для акумулятора з чутливим теплом кількість акумульованої теплової енергії визначається за фундаментальною формулою:

$$Q_{storage} = m_m \cdot c_{p,m} \cdot (T_{max} - T_{min}), \quad (2.8)$$

де: m_m — маса акумулюючого матеріалу, кг; $c_{p,m}$ — питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К); T_{max} — максимальна температура нагріву матеріалу

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(вдень), К; T_{min} – мінімальна температура матеріалу (вночі перед розрядженням), К.

Для пористого шару гальки теплову ємність необхідно розраховувати з урахуванням як твердої фази (частинок), так і газової фази (повітря в порах), проте внесок повітря зазвичай не перевищує 1–2 %. Дослідження показують, що використання промислових відходів з високою тепловою ємністю, таких як металургійні шлаки, є перспективною альтернативою для теплових акумуляторів.

Модель теплообміну в насадному акумуляторі. Для опису нестационарного теплообміну в насадному акумуляторі з твердим теплоакumuлюючим матеріалом використовується система диференціальних рівнянь, що описують зміну температури твердої фази та газу вздовж висоти акумулятора.

Рівняння енергії для газової фази (повітря):

$$\varepsilon \cdot \rho_g \cdot c_{p,g} \cdot \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho_g \cdot c_{p,g} \cdot v_g \cdot \frac{\partial T_g}{\partial z} = h_v \cdot (T_s - T_g). \quad (2.9)$$

Рівняння енергії для твердої фази (частинок):

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_{p,s} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = h_v \cdot (T_g - T_s) + \lambda_{s,eff} \cdot \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2}, \quad (2.10)$$

де: ε – порожнистість шару (об'ємна частка пор); ρ_g, ρ_s – густина газу та твердого матеріалу, кг/м³; $c_{p,g}, c_{p,s}$ – питома теплоємність газу та твердого матеріалу, Дж/(кг·К); v_g – швидкість газу в порах (фільтраційна швидкість), м/с; T_g, T_s – температура газу та твердої фази, К; h_v – об'ємний коефіцієнт тепловіддачі між газом і твердими частинками, Вт/(м³·К); $\lambda_{s,eff}$ – ефективна теплопровідність твердої фази, Вт/(м·К); z – координата вздовж висоти акумулятора, м; t – час, с.

Об'ємний коефіцієнт тепловіддачі h_v визначається через коефіцієнт тепловіддачі від газу до частинки h та питому поверхню частинок a_v :

$$h_v = h \cdot a_v = h \cdot \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_p}, \quad (2.11)$$

Де d_p – еквівалентний діаметр частинок, м.

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Коефіцієнт тепловіддачі h для потоків у пористих середовищах розраховується за критеріальними рівняннями. Для спрощених інженерних розрахунків часто використовують модель ідеального витіснення з нехтуванням теплопровідністю вздовж акумулятора ($\lambda_{s,eff} \approx 0$), що дозволяє отримати аналітичні розв'язки.

Характеристичні часи акумулятора. Для оцінки динаміки роботи насадного акумулятора вводяться два характеристичних часи:

1. *Час релаксації частинки* – характеризує швидкість нагрівання/охолодження окремої частинки:

$$\tau_p = \frac{\rho_s \cdot c_{p,s} \cdot d_p^2}{36 \cdot \lambda_g \cdot Nu} \quad (2.12)$$

2. *Час релаксації шару* – характеризує швидкість поширення теплової хвилі вздовж акумулятора:

$$\tau_b = \frac{(1-\varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_{p,s} \cdot H}{h_v \cdot (T_{g,in} - T_{s,init})}, \quad (2.13)$$

де H – висота шару акумулятора, м; $T_{g,in}$ – температура газу на вході; $T_{s,init}$ – початкова температура твердої фази.

Ці часові масштаби дозволяють визначити оптимальну висоту шару та розмір частинок для забезпечення ефективної акумуляції. Параметричний аналіз показує, що раннє перемикання повітряного потоку в поєднанні з меншими об'ємами теплового акумулятора може досягти значного зниження вартості.

Ефективність акумуляції. Ефективність акумуляції визначається як відношення енергії, відданої під час розрядження, до енергії, акумульованої під час заряджання:

$$\eta_{storage} = \frac{Q_{out}}{Q_{storage}}. \quad (2.14)$$

Для систем з насадним тепловим акумулятором ефективність акумуляції залежить від конфігурації та стратегії роботи. Дослідження показують, що використання теплової стратифікації дозволяє зменшити потребу в допоміжному теплі. *Час роботи сушарки за рахунок акумульованої енергії.* Тривалість роботи сушарки вночі або в хмарну погоду визначається як:

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_{night} = \frac{Q_{storage} \cdot \eta_{storage}}{P_{dryer}}. \quad (2.15)$$

де P_{dryer} – теплова потужність, необхідна для підтримання сушіння, Вт. Дослідження показують, що використання парафіну як РСМ дозволяє сушарці працювати до 3,5 годин без сонячного світла.

Акумуляція з використанням фазоперехідних матеріалів (PCM). Принципи акумуляції прихованого тепла. Фазоперехідні матеріали (PCM) акумулюють теплову енергію за рахунок зміни агрегатного стану (плавлення–кристалізація) при практично постійній температурі. Це забезпечує значно вищу щільність акумуляції енергії порівняно з SHS та стабільну температуру розряджання. Парафін є найпоширенішим РСМ для сонячних сушарок завдяки температурі плавлення в діапазоні 40–60 °С, що відповідає оптимальним температурам сушіння.

Кількість теплової енергії, акумульованої РСМ, визначається як сума чутливого тепла (нагрівання твердої фази до температури плавлення), прихованого тепла (власне плавлення) та чутливого тепла (перегрівання рідкої фази):

$$Q_{PCM} = m_{PCM} \cdot [c_{p,s} \cdot (T_m - T_1) + L \cdot \varphi + c_{p,l} \cdot (T_2 - T_m)], \quad (2.16)$$

де: m_{PCM} – маса РСМ, кг; $c_{p,s}$, $c_{p,l}$ – питома теплоємність у твердому та рідкому станах, Дж/(кг·К); T_m – температура плавлення, К; T_1 , T_2 – початкова та кінцева температури процесу, К; L – питома теплота плавлення, Дж/кг (для парафіну близько 200 кДж/кг); φ – ступінь завершення фазового переходу (0 до 1).

Метод ентальпії. Для чисельного моделювання процесів плавлення та кристалізації РСМ найчастіше використовується метод ентальпії, в якому рівняння енергії записується через ентальпію матеріалу:

$$\rho_{PCM} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{PCM} \cdot \nabla T), \quad (2.17)$$

де: ρ_{PCM} – густина РСМ, кг/м³ (змінюється при фазовому переході); H – питома ентальпія, Дж/кг; λ_{PCM} – теплопровідність РСМ, Вт/(м·К) (різна для твердої та рідкої фаз)

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ентальпія H пов'язана з температурою T через функцію, що враховує фазовий перехід:

$$H(T) = \begin{cases} c_{p,s} \cdot T, & T < T_m \\ c_{p,s} \cdot T_m + L \cdot \varphi, & T = T_m \\ c_{p,s} \cdot T_m + L + c_{p,l} \cdot (T - T_m), & T > T_m \end{cases} \quad (2.18)$$

Ступінь завершення фазового переходу. Ступінь завершення фазового переходу φ визначається як відношення кількості розплавленого матеріалу до загальної маси:

$$\varphi = \frac{m_{liquid}}{m_{total}} = \frac{H - c_{p,s} \cdot T_m}{L} \quad (2.19)$$

Розташування РСМ у сушарці. Дослідження показують, що розташування РСМ суттєво впливає на теплові характеристики сушарки. Порівняння трьох випадків (РСМ під абсорберною пластиною, РСМ у пленумі та без РСМ) показало, що перший випадок перевершує другий за середньою температурою в сушильній камері. Однак після 20:00 спостерігається протилежна картина, причому максимальна різниця температур порівняно з випадком без РСМ досягає 9°C для першого випадку та 8°C для другого. Що стосується рівномірності повітря, другий випадок забезпечував більш рівномірний розподіл повітря вздовж лотків порівняно з іншими випадками.

Підвищення ефективності РСМ. Основною проблемою РСМ є низька теплопровідність (для парафіну близько 0,2 Вт/(м·К)), що обмежує швидкість заряджання та розряджання. Для вирішення цієї проблеми застосовуються:

- додавання наночастинок (графен, мідь, оксид алюмінію) для підвищення теплопровідності;
- використання оребрених контейнерів;
- застосування теплопровідних матриць (металева піна, графітові структури).

Чисельне моделювання показало, що використання графен-нанопідсиленого РСМ дозволяє значно підвищити теплову ефективність сонячних сушарок.

Комбіновані SHS-PCM системи. Гібридні системи, що поєднують SHS та PCM, дозволяють використовувати переваги обох типів акумуляторів:

- PCM забезпечує стабільну температуру розряджання в основному діапазоні;
- SHS виконує роль буферної ємності, знижує загальну вартість системи та забезпечує додаткову акумуляцію при високих температурах.

Ексергетичний аналіз змішаної сонячної сушарки з комбінованим акумулятором чутливого та прихованого тепла показав максимальну ексергетичну ефективність 51,3 % та середню ексергетичну ефективність 34,3 %. Термодинамічний аналіз підтверджує ефективність комбінованих систем для сушіння плодоовочевої продукції.

2.3 Кінетика сушіння плодоовочевої продукції

Фундаментальні основи процесу сушіння. Сушіння є складним тепло-масообмінним процесом, в якому волога видаляється з матеріалу шляхом випаровування. Рушійною силою процесу є різниця парціальних тисків водяної пари на поверхні матеріалу та в навколишньому повітрі. Процес сушіння складається з двох основних періодів:

1. *Період постійної швидкості* – волога видаляється з поверхні матеріалу, швидкість сушіння визначається зовнішніми умовами (температура, вологість, швидкість повітря).

2. *Період падаючої швидкості* – волога видаляється з внутрішніх шарів матеріалу, швидкість сушіння визначається внутрішньою дифузією вологи.

Для більшості плодоовочевої продукції період постійної швидкості є коротким, а основний процес відбувається в періоді падаючої швидкості. Дослідження показують, що кінетика сушіння папаї має одну фазу сушіння, а саме фазу падаючої швидкості.

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Математичні моделі кінетики сушіння. Для опису кінетики сушіння плодоовочевої продукції використовуються різні математичні моделі: теоретичні (на основі законів дифузії), напівемпіричні та емпіричні.

Теоретичні моделі. Фундаментальною теоретичною моделлю є рівняння дифузії Фіка для тонкого шару:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \cdot \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}, \quad (2.20)$$

де: M – локальна вологість матеріалу (у відносних одиницях), %; D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії води, $\text{м}^2/\text{с}$; x – координата в напрямку дифузії, м .

Розв'язок цього рівняння для пластини товщиною $2L$ з рівномірним початковим розподілом води та граничними умовами третього роду має вигляд:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cdot \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4L^2} \right] \quad (2.21)$$

Де MR – відношення вологості (moisture ratio); M_0 – початкова вологість; M_e – рівноважна вологість.

Для практичних розрахунків часто використовують спрощений вираз (перший член ряду):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4L^2} \right] \quad (2.22)$$

Напівемпіричні моделі. Найбільшого поширення в інженерних розрахунках набули напівемпіричні моделі, які добре узгоджуються з експериментальними даними:

1. *Модель Льюїса (експоненційна)* – найпростіша модель:

$$MR = \exp(-k \cdot t) \quad (2.23)$$

де k – константа сушіння, с^{-1} .

2. *Модель Пейджа* – враховує нелінійність процесу:

$$MR = \exp(-k \cdot t^n) \quad (2.24)$$

де n – емпіричний показник. Дослідження показують, що модель Пейджа та модель Вейбулла передбачають відношення вологості з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,958$ та $0,970$ відповідно.

3. *Модифікована модель Хендерсона і Пабіса* – рекомендована для визначення кінетики сушіння цитрусових:

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_2 \cdot t) \quad (2.25)$$

4. *Модель Міділі та інших* – універсальна модель:

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t \quad (2.26)$$

Вибір моделі визначається типом продукції та умовами сушіння. Для яблук та інших фруктів добре працюють моделі Пейджа та Міділі, для овочів – модифікована модель Хендерсона і Пабіса.

Термодинамічні моделі. Сучасні дослідження використовують також термодинамічні моделі, що враховують активність води та енергію активації дифузії. Ефективний коефіцієнт дифузії зазвичай описується рівнянням Арреніуса:

$$D_{eff} = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right), \quad (2.27)$$

де: D_0 – передекспоненційний множник, $\text{м}^2/\text{с}$; E_a – енергія активації дифузії, $\text{Дж}/\text{моль}$; R – універсальна газова стала, $8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; T – абсолютна температура, К .

Вплив параметрів сушіння на кінетику. Температура сушіння є найважливішим фактором, що впливає на швидкість видалення вологи. Підвищення температури збільшує коефіцієнт дифузії та швидкість випаровування, але може негативно впливати на якість продукції. Багато продуктів надзвичайно чутливі до високих температур, що спричиняє руйнування вітамінів і негативно впливає на якість продукту. Дотримання оптимальної температури є дуже важливим для забезпечення кращої якості.

Швидкість повітря впливає на зовнішній масоперенос: зі збільшенням швидкості зменшується товщина дифузійного прикордонного шару, що інтенсифікує процес.

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контрольоване сонячне сушіння з примусовою конвекцією та непрямим сонячним теплом дає результати з нижчою вологістю, ніж сушіння з природною конвекцією. Відносна вологість повітря визначає рушійну силу процесу – чим нижча вологість, тим вища швидкість сушіння.

2.4 Аеродинамічний розрахунок системи

Гідравлічний опір елементів системи (рисунк 2.2). Для забезпечення ефективного сушіння необхідно підтримувати оптимальну швидкість повітряного потоку в сушильній камері. Сумарні втрати тиску в системі визначаються як сума втрат в окремих елементах:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{collector} + \Delta P_{storage} + \Delta P_{chamber} + \Delta P_{ducts} \quad (2.28)$$

де $\Delta P_{collector}$ – втрати тиску в сонячному колекторі; $\Delta P_{storage}$ – втрати в шарі акумулятора; $\Delta P_{chamber}$ – втрати в сушильній камері; ΔP_{ducts} – втрати в повітропроводах.

Втрати тиску в насадному акумуляторі (формула Ергана). Для шару гальки або іншого зернистого матеріалу втрати тиску розраховуються за формулою Ергана:

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot v}{d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{d_p}, \quad (2.29)$$

де: ΔP – перепад тиску, Па; H – висота шару, м; ε – порожнистість шару; μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с; v – швидкість повітря (фільтраційна), м/с; d_p – еквівалентний діаметр частинок, м; ρ – густина повітря, кг/м³.

Перший член формули описує ламінарні втрати (в'язкісний опір), другий – турбулентні втрати (інерційний опір). *Визначення необхідної потужності вентилятора.* Потужність, необхідна для приводу вентилятора, визначається за формулою:

$$P_{fan} = \frac{V \cdot \Delta P_{total}}{\eta_{fan}}, \quad (2.30)$$

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де: V – об'ємна витрата повітря, $\text{м}^3/\text{с}$; ΔP_{total} – сумарні втрати тиску, Па;
 η_{fan} – ККД вентилятора (зазвичай 0,5–0,7).

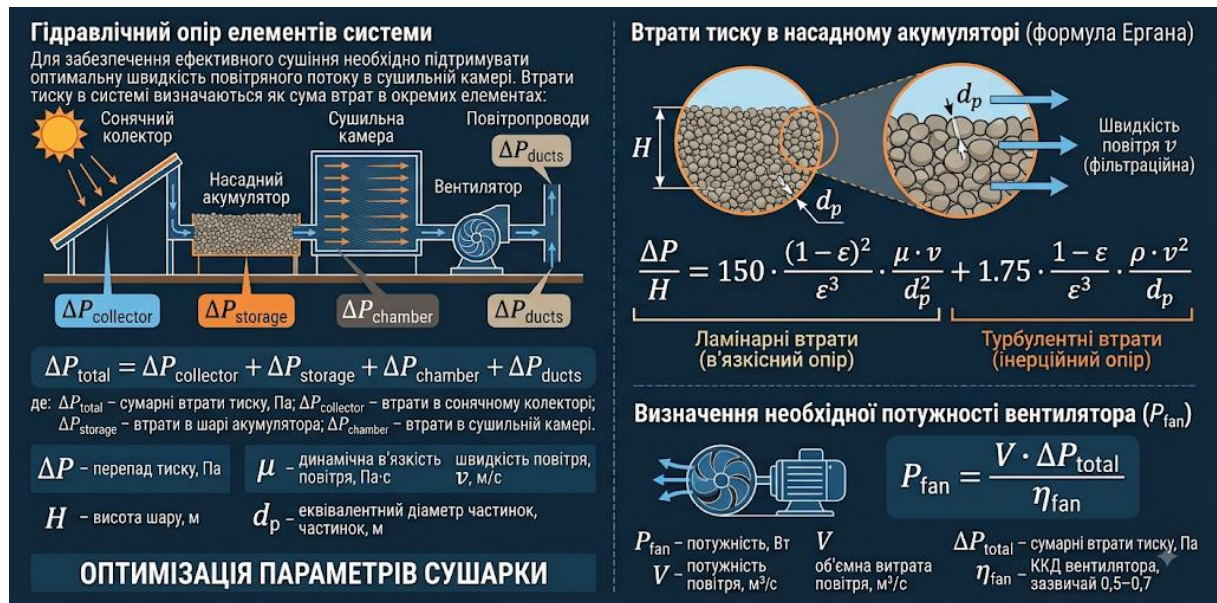


Рисунок 2.2 – Аеродинамічний розрахунок системи сонячного сушіння

2.5 Чисельне моделювання та CFD-аналіз

Застосування CFD для оптимізації конструкції. Сучасні дослідження сонячних сушарок активно використовують методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) для оптимізації конструкції та прогнозування робочих характеристик. Дорогі експериментальні установки призвели до використання методів комп'ютерного моделювання, таких як CFD, для оптимізації умов сушіння та конструкції сушарки при збереженні якості продукції. CFD-моделювання дозволяє:

- візуалізувати поля температур, швидкостей і тисків у системі;
- оптимізувати геометрію колектора, акумулятора та сушильної камери;
- прогнозувати вплив конструктивних змін на ефективність;
- зменшити кількість дорогих натурних експериментів.

Повний CFD-аналіз включає розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса для потоку повітря, рівняння енергії для температурного поля та рівняння дифузії для вологості. Керівні рівняння, засновані на стандартній к-ε моделі

турбулентності, розв'язуються методом кінцевих об'ємів з використанням комерційного коду ANSYS-Fluent.

Типи CFD-моделей. Залежно від складності задачі використовуються різні типи CFD-моделей:

1. *2D-моделі* – для попереднього аналізу та оптимізації перерізів.
2. *3D-моделі* – для повного аналізу просторового розподілу параметрів.
3. *Стационарні моделі* – для аналізу сталих режимів.
4. *Нестационарні моделі* – для аналізу перехідних процесів (заряджання/розряджання акумулятора).

Точність CFD-моделей підтверджується експериментальними даними. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показує подібний профіль та підтверджує точність моделі. Чисельне моделювання з використанням ANSYS Fluent було підтверджено експериментально.

2.6 Ексергетичний аналіз сонячної сушарки

Основи ексергетичного аналізу (рисунк 2.3). Ексергетичний аналіз дозволяє оцінити якість енергії та визначити місця найбільших втрат роботоздатності в системі. На відміну від енергетичного аналізу, який враховує лише кількість енергії, ексергетичний аналіз враховує також її якість (здатність виконувати роботу).

Ексергія теплового потоку визначається за формулою:

$$\dot{E}x = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (2.31)$$

де $\dot{Q}$ – тепловий потік, Вт; T_0 – температура навколишнього середовища, К; T – температура джерела тепла, К.

Ексергетичний баланс сонячної сушарки. Ексергетичний баланс для кожного елемента системи записується як:

$$\dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} = \dot{E}x_{destroyed} \quad (2.32)$$

Сумарна ексергетична ефективність сушарки визначається як:

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{evaporation}}{\dot{E}x_{solar}}, \quad (2.33)$$

Де $\dot{E}x_{evaporation}$ – ексергія, використана на випаровування вологи; $\dot{E}x_{solar}$ – ексергія сонячного випромінювання.

Дослідження показують, що для сонячних сушарок з комбінованим SHS-PCM акумулятором максимальна ексергетична ефективність сягає 51,3 %, середня – 34,3 %. Для порівняльного аналізу чутливих та латентних теплових акумуляторів з використанням класичного та розширеного ексергоекономічного та ексергетичного аналізів було показано, що 78,13 % та 79,36 % загальної ексергетичної деструкції в системах LHSM та SHSM. Теплоакумуючі блоки становили 34,49 % та 33,85 % загальної уникненої ексергетичної деструкції в системах SHSM та LHSM відповідно.

Індикатори стійкості та ефективності. Для оцінки стійкості системи використовуються:

– *Індекс стійкості ексергії* – відношення ексергії, що використовується, до загальної ексергії на вході.

– *Коефіцієнт відновлення ексергії* – характеризує здатність системи зберігати якість енергії.

Інтеграція теплових акумуляторів покращує ексергетичні показники завдяки стабілізації температурного режиму та зменшенню втрат.

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.3 – Ексергетичний аналіз соячної сушарки

Висновки

1. Розроблено фундаментальні математичні моделі теплообміну в плоскому сонячному колекторі на основі рівняння Хоттеля-Віллє-Блісса. Визначено, що термічний ККД якісних повітряних колекторів сягає 43–52 %, а при інтеграції РСМ може підвищуватися. Теплова ефективність з РСМ становила 14 % порівняно з 11 % без РСМ.

2. Побудовано систему диференціальних рівнянь для опису нестационарного теплообміну в насадному акумуляторі з твердим теплоакumuлюючим матеріалом. Введено характеристичні часи релаксації частинки та шару, що дозволяють визначити оптимальну висоту шару та розмір частинок. Параметричний аналіз показує, що раннє перемикання повітряного потоку в поєднанні з меншими об'ємами теплового акумулятора може досягти значного зниження вартості.

3. Розроблено математичну модель акумуляції теплової енергії з використанням фазоперехідних матеріалів на основі методу ентальпії. Встановлено, що парафін є оптимальним РСМ для сонячних сушарок завдяки температурі плавлення 40–60 °С та питомій теплоті плавлення близько 200 кДж/кг. Використання парафіну як РСМ дозволяє сушарці працювати до 3,5 годин без сонячного світла. Розташування РСМ під абсорберною пластиною забезпечує вищу середню температуру в сушильній камері.

4. Проаналізовано математичні моделі кінетики сушіння плодоовочевої продукції. Встановлено, що напівемпіричні моделі (Пейджа, модифікована Хендерсона і Пабіса) забезпечують достатню точність для інженерних розрахунків. Рівняння Арреніуса дозволяє описати температурну залежність ефективного коефіцієнта дифузії вологи.

5. Виконано аеродинамічний розрахунок системи з використанням формули Ергана для визначення втрат тиску в шарі акумулятора. Визначено залежність втрат тиску від порожнистості шару, розміру частинок та швидкості повітря.

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Обґрунтовано доцільність застосування методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) для оптимізації конструкції сонячної сушарки. Точність CFD-моделей підтверджується експериментальними даними. Керівні рівняння розв'язуються методом кінцевих об'ємів з використанням комерційного коду ANSYS-Fluent.

7. Проведено ексергетичний аналіз сонячної сушарки з тепловим акумулятором. Встановлено, що максимальна ексергетична ефективність для комбінованих SHS-PCM систем сягає 51,3 %, середня – 34,3 %. Теплоакумуючі блоки становили 34,49 % та 33,85 % загальної уникненої ексергетичної деструкції в системах SHSM та LHSM відповідно. Інтеграція теплових акумуляторів покращує ексергетичні показники завдяки стабілізації температурного режиму.

Отримані теоретичні залежності та математичні моделі створюють науково обґрунтовану базу для інженерного проєктування сонячної сушарки з тепловим акумулятором. Вони дозволяють оптимізувати конструктивні параметри, прогнозувати робочі характеристики та оцінювати ефективність системи на етапі проєктування, що суттєво скорочує витрати на розробку та експериментальні дослідження. Сучасні дослідження підкреслюють вирішальну роль чисельного моделювання в оптимізації конструкції теплових акумуляторів для сонячних сушарок.

					14.17 - КР. 022.2.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА КОНСТРУКТИВНЕ ПРОЄКТУВАННЯ СОНЯЧНОЇ СУШАРКИ З ТЕПЛОВИМ АКУМУЛЯТОРОМ

На основі теоретичних залежностей, отриманих у розділі 2, виконано інженерні розрахунки основних конструктивних та технологічних параметрів сонячної сушарки з тепловим акумулятором. Розрахунки виконано з використанням довідкових даних, нормативної документації та методів математичного моделювання. Інженерний підхід до проєктування базується на комплексному врахуванні теплових, аеродинамічних та конструктивних факторів, що забезпечують ефективну та надійну роботу установки в різних кліматичних умовах України.

3.1 Вихідні дані та обґрунтування технічних вимог до проєктування

Агротехнічні та технологічні вимоги до сушіння плодоовочевої продукції (рисунки 3.1). Проєктування сонячної сушарки починається з чіткого визначення технічних вимог, які базуються на агротехнічних параметрах сушіння різних видів плодоовочевої продукції. Для більшості фруктів та овочів оптимальна температура сушіння становить 45–60 °С, що забезпечує безпечне видалення вологи без втрати харчових та поживних властивостей продукту. Контрольоване сонячне сушіння з примусовою конвекцією та непрямим сонячним теплом дає результати з нижчою кінцевою вологістю порівняно з сушінням з природною конвекцією.

					14.17 - КР.022.3.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3			
Розроб.		Тарасов Д.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						45	20	

Вихідні дані для розрахунку прийнято на основі типових умов експлуатації сонячних сушарок в Україні та узагальнених вимог до сушіння плодоовочевої продукції:

- тип продукції: плоди (яблука, банани, хурма), овочі (цибуля, горох, морква, томати, перець), ягоди;
- початкова вологість продукції: 75–90 % (залежно від виду);
- кінцева вологість продукції: 10–15 % (для забезпечення тривалого зберігання);
- оптимальна температура сушіння: 50–60 °С для більшості видів;
- рекомендована швидкість повітря в сушильній камері: 0,5–2,0 м/с;
- місткість сушильної камери: 50 кг свіжої продукції (типова для фермерських господарств).



Рисунок 3.1 – Вихідні дані та обґрунтування технічних вимог до проектування сонячної сушарки плодоовочевої продукції в Україні

Кліматичні умови та сонячний потенціал України. Україна має значний сонячний потенціал, що робить використання сонячних сушарок економічно та технічно доцільним.

Середньорічна сонячна радіація на території України становить 1100–1300 кВт·год/м², при цьому в південних регіонах цей показник сягає 1400–1450 кВт·год/м². Середня тривалість сонячного сьйва в період активного сушіння (липень–вересень) становить 8–10 годин на добу, що забезпечує достатній енергетичний ресурс для роботи сушарки.

Для розрахунків приймаємо такі кліматичні параметри:

- середньодобова інтенсивність сонячної радіації в літній період:
 $G = 700 \text{ Вт/м}^2$ (з урахуванням хмарності та кута падіння променів);
- тривалість сонячного сьйва: $t_{sun} = 8 \text{ год/добу}$;
- температура навколишнього повітря в період сушіння: $T_a = 20 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- відносна вологість повітря: $\varphi = 40 \dots 60 \%$.

Технічні вимоги до конструкції. На основі аналізу існуючих конструкцій сонячних сушарок (розділ 1) та теоретичних досліджень (розділ 2) сформульовано такі технічні вимоги до проєктованої установки:

1. *Тип сушарки:* непрямого нагріву з плоским сонячним колектором та насадним тепловим акумулятором. Така схема забезпечує більш рівномірне та якісне сушіння порівняно з прямими системами, захищає продукт від прямого ультрафіолетового випромінювання та дозволяє інтегрувати тепловий акумулятор.

2. *Тип циркуляції повітря:* примусова (активна) з використанням вентилятора для інтенсифікації процесу сушіння та забезпечення рівномірного розподілу температури.

3. *Тепловий акумулятор:* комбінований SHS-PCM з використанням гальки як основного твердого акумулюючого матеріалу та парафіну як фазоперехідного матеріалу для підвищення ефективності та стабілізації температури.

4. *Матеріали:* доступні, корозійностійкі, з низькою теплопровідністю для ізоляції та високою теплопровідністю для абсорбера.

5. *Мобільність:* конструкція повинна забезпечувати можливість транспортування та встановлення в різних умовах.

					14.17 - КР. 022.3.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Розрахунок параметрів сонячного колектора

Визначення необхідної кількості теплової енергії для сушіння. Першим етапом теплового розрахунку є визначення кількості вологи, яку необхідно видалити з продукції, та відповідної кількості теплової енергії.

Маса свіжої продукції, що завантажується в сушарку: $m_{fresh} = 50$ кг. Початкова вологість продукції (для яблук): $M_0 = 85$ %. Кінцева вологість: $M_k = 12$ %. Маса сухої речовини в продукті:

$$m_{dry} = m_{fresh} \cdot \frac{100 - M_0}{100} = 50 \cdot \frac{100 - 85}{100} = 7,5 \text{ кг}$$

Маса води, що видаляється:

$$m_w = m_{fresh} - \frac{m_{dry}}{100 - M_k} \cdot 100 = 50 - \frac{7,5}{100 - 12} \cdot 100 = 50 - 8,52 = 41,48 \text{ кг}$$

Питома теплота пароутворення води при температурі 50–60 °C: $r = 2380$ кДж/кг. Теплова енергія, необхідна для випаровування вологи:

$$Q_{evap} = m_w \cdot r = 41,48 \cdot 2380 = 98\,722 \text{ кДж} \approx 27,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

З урахуванням теплових втрат у системі (ККД сушарки $\eta_{dryer} = 0,5 \dots 0,6$):

$$Q_{req} = \frac{Q_{evap}}{\eta_{dryer}} = \frac{27,4}{0,55} \approx 49,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Округлюємо до $Q_{req} = 50 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Розрахунок площі сонячного колектора. Площа сонячного колектора визначається з умови забезпечення необхідної кількості теплової енергії протягом світлового дня. При інтенсивності сонячної радіації $G = 700$ Вт/м² та тривалості сонячного сяйва $t_{sun} = 8$ год/добу, енергія, що надходить на 1 м² колектора за день:

$$E_{day} = G \cdot t_{sun} = 700 \cdot 8 = 5600 \text{ Вт} \cdot \text{год/м}^2 = 5,6 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^2$$

Термічний ККД плоского сонячного колектора для повітряних систем становить $\eta_c = 0,45 \dots 0,52$. Приймаємо $\eta_c = 0,48$. Корисна енергія від 1 м² колектора за день:

$$E_{useful} = E_{day} \cdot \eta_c = 5,6 \cdot 0,48 = 2,688 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^2$$

					14.17 - КР. 022.3.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Необхідна площа колектора:

$$A_c = \frac{Q_{req}}{E_{useful}} = \frac{50}{2,688} \approx 18,6 \text{ м}^2$$

Оскільки площа 18,6 м² є значною для фермерських господарств, доцільно використовувати два колектори по 3,5–4,0 м² з подовженням часу сушіння до 16–20 год за рахунок використання теплового акумулятора. Приймаємо площу колектора $A_c = 3,5 \text{ м}^2$. При такій площі за день можна отримати:

$$Q_{daily} = A_c \cdot E_{useful} = 3,5 \cdot 2,688 = 9,41 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

З урахуванням акумуляованої енергії, це дозволяє провести сушіння за 2–3 дні.

Конструктивні параметри колектора (рисунок 3.2). Плоский сонячний колектор складається з таких основних елементів:

- *Корпус*: з деревини або алюмінієвого профілю, з теплоізоляцією (мінеральна вата товщиною 50 мм).
- *Абсорбер*: алюмінієвий лист товщиною 1–2 мм, пофарбований у матово-чорний колір для максимального поглинання сонячного випромінювання. Для підвищення ефективності можливе застосування селективних покриттів.
- *Прозоре покриття*: скло товщиною 4 мм з низьким вмістом заліза (для збільшення пропускання). Можливе використання подвійного скління для зменшення теплових втрат.
- *Повітряний канал*: висотою 20–30 мм між абсорбером і склом для проходу повітря.
- *Теплоізоляція*: з боків та знизу – мінеральна вата або пінополістирол товщиною 50 мм.

При площі колектора 3,5 м² та співвідношенні сторін 2:1, розміри колектора становлять приблизно 2,65 м × 1,32 м. Для зручності виготовлення приймаємо розміри 2,5 м × 1,4 м (фактична площа 3,5 м²).

Теплова потужність колектора в піковий сонячний час:

$$Q_u = A_c \cdot \eta_c \cdot G = 3,5 \cdot 0,48 \cdot 700 = 1176 \text{ Вт} \approx 1,18 \text{ кВт}$$

					14.17 - КР. 022.3.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

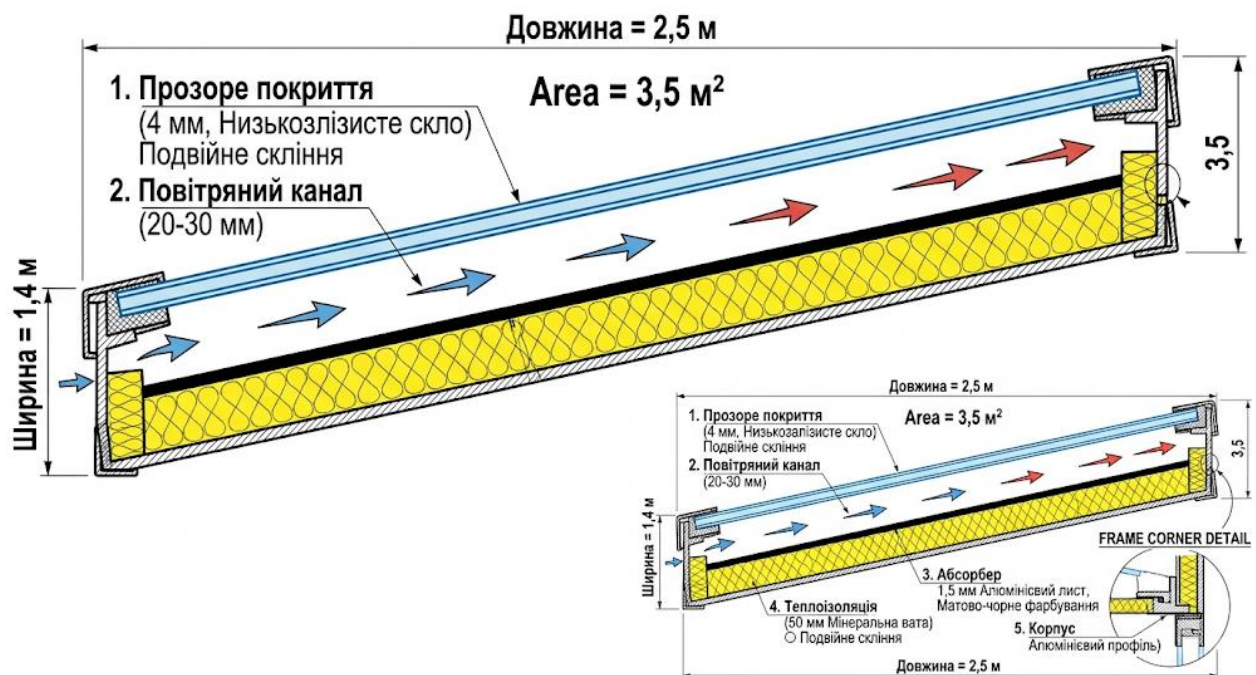


Рисунок 3.2 – Параметри сонячного колектора

3.3 Розрахунок параметрів теплового акумулятора

Визначення необхідної ємності теплового акумулятора. Для забезпечення безперервної роботи сушарки в нічний час або в хмарну погоду необхідно акумулювати достатню кількість теплової енергії. Тривалість роботи сушарки за рахунок акумульованої енергії приймаємо $t_{night} = 6$ год (з 20:00 до 02:00 або з урахуванням хмарних періодів).

Необхідна кількість акумульованої енергії:

$$Q_{storage, req} = Q_u \cdot t_{night} \cdot k_{res}, \quad (3.1)$$

де $k_{res} = 1,2$ – коефіцієнт резерву.

$$Q_{storage, req} = 1176 \cdot 6 \cdot 3600 \cdot 1,2 = 30\,491\,520 \text{ Дж} \approx 30,5 \text{ МДж}$$

Розрахунок акумулятора з твердим матеріалом (SHS). Вибір матеріалу. Як основний твердий теплоакумуючий матеріал обираємо гальку (річковий камінь) завдяки її доступності, низькій вартості та високій теплоємності. Теплофізичні властивості гальки:

– густина: $\rho_s = 1600 \text{ кг/м}^3$;

14.17 - КР. 022.3.000 ПЗ					Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	50

- питома теплоємність: $c_{p,s} = 840 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$;
- теплопровідність: $\lambda_s = 1,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$;
- порожнистість шару: $\varepsilon = 0,4$;
- еквівалентний діаметр частинок: $d_p = 0,02 \text{ м (20 мм)}$.

Маса та об'єм акумулятора. При перепаді температур у шарі гальки $\Delta T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (нагрівання від 35 до $60 \text{ }^\circ\text{C}$), необхідна маса гальки:

$$m_s = \frac{Q_{storage, req}}{c_{p,s} \cdot \Delta T} = \frac{30\,491\,520}{840 \cdot 25} \approx 1452 \text{ кг}$$

Об'єм твердої фази гальки:

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{1452}{1600} = 0,9075 \text{ м}^3$$

З урахуванням порожнистості шару ($\varepsilon = 0,4$), загальний об'єм акумулятора:

$$V_{storage} = \frac{V_s}{1 - \varepsilon} = \frac{0,9075}{0,6} \approx 1,51 \text{ м}^3$$

З урахуванням коефіцієнта запасу $k_{res} = 1,1$, приймаємо об'єм теплового акумулятора $V_{storage} = 1,5 \text{ м}^3$.

Геометричні параметри акумулятора. При висоті шару гальки $H = 0,6 \text{ м}$, площа поперечного перерізу акумулятора:

$$A_{storage} = \frac{V_{storage}}{H} = \frac{1,5}{0,6} = 2,5 \text{ м}^2$$

Приймаємо розміри акумулятора в плані $1,6 \text{ м} \times 1,6 \text{ м}$ (площа $2,56 \text{ м}^2$), висота $0,6 \text{ м}$. Акумулятор виготовляється у вигляді металевих контейнера з перфорованим дном та кришкою для рівномірного розподілу повітря.

Час заряджання акумулятора. При тепловій потужності колектора 1176 Вт , час повного заряджання акумулятора:

$$t_{charge} = \frac{Q_{storage, req}}{Q_u} = \frac{30\,491\,520}{1176} \approx 25\,928 \text{ с} \approx 7,2 \text{ год}$$

Це узгоджується з тривалістю сонячного дня (8 год), що підтверджує правильність вибору параметрів акумулятора.

					14.17 - КР. 022.3.000 ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ефективність акумуляції. Для галькових акумуляторів ефективність акумуляції зазвичай становить 50–70 %. Приймаємо $\eta_{storage} = 0,65$. Тоді фактична кількість енергії, яку можна використати вночі:

$$Q_{night,actual} = Q_{storage,req} \cdot \eta_{storage} = 30,5 \cdot 0,65 = 19,8 \text{ МДж}$$

Тривалість роботи вночі при тепловій потужності 1176 Вт:

$$t_{night,actual} = \frac{Q_{night,actual}}{Q_u} = \frac{19\,800\,000}{1176} \approx 16\,837 \text{ с} \approx 4,7 \text{ год}$$

Це забезпечує роботу сушарки протягом 4–5 годин після заходу сонця, що є достатнім для підтримання безперервного процесу сушіння.

Додаткове використання фазоперехідного матеріалу (PCM). Для підвищення ефективності теплового акумулятора та стабілізації температури розряджання доцільно використовувати комбіновану SHS-PCM систему. Парафін є оптимальним PCM для сонячних сушарок завдяки температурі плавлення в діапазоні 40–60 °С.

Вибір PCM. Обираємо технічний парафін з температурою плавлення $T_m = 52 \text{ °С}$ та питомою теплотою плавлення $L = 200 \text{ кДж/кг}$. Питома теплоємність парафіну: $c_{p,paraffin} = 2100 \text{ Дж/(кг·К)}$. Густина парафіну: $\rho_{paraffin} = 900 \text{ кг/м}^3$.

Кількість PCM. Для забезпечення стабільної температури протягом 4 годин розряджання, необхідна кількість парафіну:

$$Q_{PCM,req} = Q_u \cdot t_{night} \cdot 0,5 = 1176 \cdot 4 \cdot 3600 \cdot 0,5 = 8\,467\,200 \text{ Дж} \approx 8,5 \text{ МДж}$$

Маса парафіну:

$$m_{PCM} = \frac{Q_{PCM,req}}{L} = \frac{8\,467\,200}{200\,000} \approx 42,3 \text{ кг}$$

Об'єм парафіну:

$$V_{PCM} = \frac{m_{PCM}}{\rho_{paraffin}} = \frac{42,3}{900} \approx 0,047 \text{ м}^3 = 47 \text{ л}$$

Приймаємо $m_{PCM} = 50 \text{ кг}$ парафіну, розміщеного в герметичних контейнерах (алюмінієві труби або пластини), інтегрованих у шар гальки.

					14.17 - КР. 022.3.000 ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструкція PCM-модуля. Контейнери з парафіном виготовляються у вигляді алюмінієвих труб діаметром 50 мм, завдовжки 1,0 м, загерметизованих з торців. Труби розміщуються горизонтально всередині шару гальки на різних рівнях для рівномірного теплообміну. Загальна кількість труб – 12–15 шт.

Переваги комбінованої системи. Комбінована SHS-PCM система забезпечує:

- стабільну температуру повітря на виході з акумулятора в межах 45–55 °С протягом усього періоду розряджання;
- підвищення загальної ефективності акумуляції на 10–15 %;
- скорочення часу сушіння завдяки більш стабільним температурним умовам;
- краще збереження якості продукції.

3.4 Розрахунок сушильної камери

Визначення об'єму та конструктивних параметрів камери (рисунки 3.3). Сушильна камери призначена для розміщення продукції та забезпечення рівномірного обдування її нагрітим повітрям. Конструкція камери повинна забезпечувати:

- рівномірний розподіл повітря по всіх лотках;
- зручне завантаження та вивантаження продукції;
- мінімальні теплові втрати;
- гігієнічність та легкість очищення.

Розміри лотків. При завантаженні 50 кг свіжої продукції та товщині шару 30–50 мм, необхідна загальна площа лотків:

$$A_{trays} = \frac{m_{fresh}}{\rho_{prod} \cdot h_{layer}}, \quad (3.2)$$

де $\rho_{prod} = 600 \text{ кг/м}^3$ – насипна густина продукції (для яблук), $h_{layer} = 0,04 \text{ м}$ – товщина шару.

					14.17 - КР. 022.3.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

$$A_{trays} = \frac{50}{600 \cdot 0,04} \approx 2,08 \text{ м}^2$$

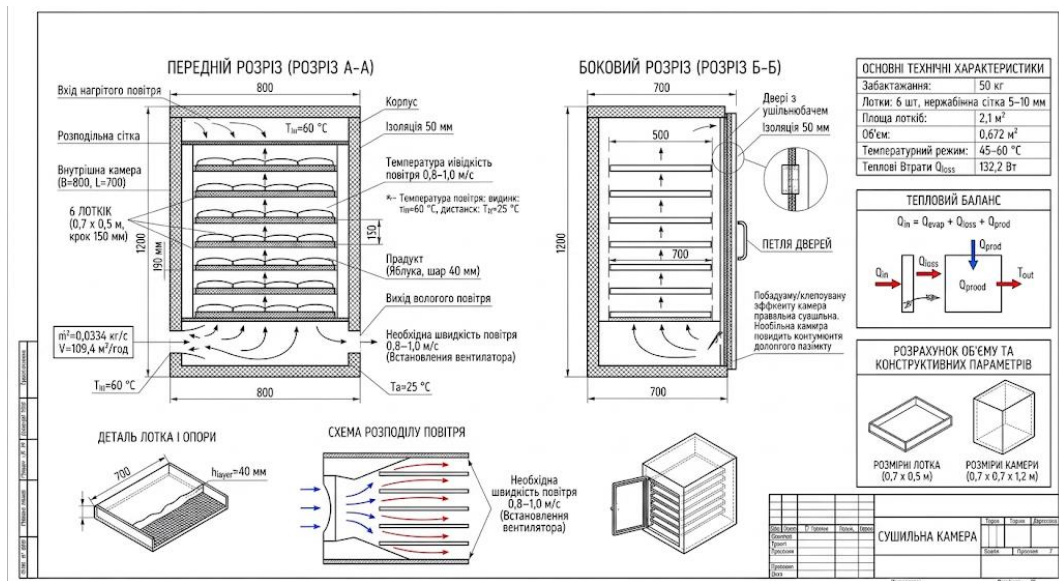


Рисунок 3.3 – Технічне креслення: сушільна камера для фруктів та овочів

Приймаємо 6 лотків розміром 0,7 м × 0,5 м (площа одного лотка 0,35 м², загальна площа 2,1 м²). Лотки виготовляються з нержавіючої сітки з розміром вічка 5–10 мм для забезпечення вільної циркуляції повітря.

Розміри камери. Внутрішні розміри сушильної камери:

- ширина: $B = 0,8$ м (з урахуванням зазорів між лотками та стінками);
- глибина: $L = 0,7$ м;
- висота: $H = 1,2$ м (з урахуванням 6 лотків з кроком 0,15 м та вільного простору зверху та знизу).

Об'єм камери: $V_{chamber} = 0,8 \cdot 0,7 \cdot 1,2 = 0,672 \text{ м}^3$.

Розрахунок витрати повітря через камеру. Масова витрата повітря через сушильну камеру визначається з умови забезпечення необхідної теплової потужності та температурного режиму. Теплова потужність, що передається повітрю в колекторі: $Q_u = 1176$ Вт. Підвищення температури повітря в колекторі (від $T_a = 25$ °C до $T_{in} = 60$ °C): $\Delta T = 35$ °C.

Масова витрата повітря:

$$\dot{m} = \frac{Q_u}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{1176}{1005 \cdot 35} \approx 0,0334 \text{ кг/с}$$

Об'ємна витрата повітря (при густині $\rho = 1,1 \text{ кг/м}^3$):

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0,0334}{1,1} \approx 0,0304 \text{ м}^3/\text{с} = 109,4 \text{ м}^3/\text{год}$$

Швидкість повітря в сушильній камері (при площі поперечного перерізу камери $S = B \cdot L = 0,8 \cdot 0,7 = 0,56 \text{ м}^2$):

$$v_{chamber} = \frac{V}{S} = \frac{0,0304}{0,56} \approx 0,054 \text{ м/с}$$

Це значення є нижчим за рекомендоване (0,5–2,0 м/с). Для збільшення швидкості повітря необхідно зменшити площу поперечного перерізу камери або збільшити витрату повітря. Приймаємо конструкцію з повітряним каналом, що звужується, або встановлюємо додатковий вентилятор для збільшення швидкості до 0,8–1,0 м/с.

Тепловий баланс сушильної камери. Тепловий баланс сушильної камери описує розподіл теплової енергії, що надходить з нагрітим повітрям:

$$Q_{in} = Q_{evap} + Q_{loss} + Q_{prod}, \quad (3.3)$$

де: $Q_{in} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{in} - T_{out})$ – теплота, віддана повітрям; Q_{evap} – теплота на випаровування води; Q_{loss} – теплові втрати через стінки камери; Q_{prod} – теплота на нагрівання продукту.

Теплові втрати через стінки камери при товщині ізоляції 50 мм та коефіцієнті теплопровідності $\lambda_{ins} = 0,04 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$:

$$Q_{loss} = \frac{\lambda_{ins}}{\delta_{ins}} \cdot A_{wall} \cdot (T_{in} - T_a), \quad (3.4)$$

де $A_{wall} \approx 2 \cdot (0,8 \cdot 1,2 + 0,7 \cdot 1,2 + 0,8 \cdot 0,7) = 4,72 \text{ м}^2$ – площа поверхні камери.

$$Q_{loss} = \frac{0,04}{0,05} \cdot 4,72 \cdot (60 - 25) = 0,8 \cdot 4,72 \cdot 35 = 132,2 \text{ Вт}$$

Теплота на нагрівання продукту (від 25 до 60 °С):

$$Q_{prod} = m_{fresh} \cdot c_{p,prod} \cdot (T_{prod} - T_a) \approx 50 \cdot 3600 \cdot 35 = 6\,300\,000 \text{ Дж} \\ \approx 1,75 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для забезпечення ефективного сушіння необхідно, щоб температура повітря на виході з камери була не нижче 40–45 °С.

					14.17 - КР. 022.3.000 ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5 Аеродинамічний розрахунок системи та вибір вентилятора

Розрахунок втрат тиску в елементах системи. Сумарні втрати тиску в системі визначаються як сума втрат в окремих елементах:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{collector} + \Delta P_{storage} + \Delta P_{chamber} + \Delta P_{ducts}$$

Втрати тиску в сонячному колекторі. Для повітряного каналу висотою 30 мм та довжиною 2,5 м при швидкості повітря 0,5–1,0 м/с, втрати тиску становлять приблизно 5–15 Па.

Втрати тиску в шарі гальки. Для шару гальки висотою 0,6 м, порожнистістю $\varepsilon = 0,4$, діаметром частинок $d_p = 0,02$ м та швидкістю повітря $v = 0,5$ м/с, втрати тиску розраховуються за формулою Ергана:

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot v}{d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{d_p}$$

При $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\rho = 1,1$ кг/м³:

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \cdot \frac{0,6^2}{0,4^3} \cdot \frac{1,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5}{0,02^2} + 1,75 \cdot \frac{0,6}{0,4^3} \cdot \frac{1,1 \cdot 0,5^2}{0,02}$$

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \cdot \frac{0,36}{0,064} \cdot \frac{9 \cdot 10^{-6}}{0,0004} + 1,75 \cdot \frac{0,6}{0,064} \cdot \frac{0,275}{0,02}$$

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \cdot 5,625 \cdot 0,0225 + 1,75 \cdot 9,375 \cdot 13,75$$

$$\frac{\Delta P}{H} = 18,98 + 225,6 \approx 244,6 \text{ Па/м}$$

$$\Delta P_{storage} = 244,6 \cdot 0,6 = 146,8 \text{ Па}$$

Втрати тиску в сушильній камері. При швидкості повітря 0,5 м/с та наявності лотків, втрати тиску становлять приблизно 20–40 Па.

Втрати в повітропроводах. При загальній довжині повітропроводів 3 м та швидкості 2–3 м/с, втрати становлять 10–20 Па.

Сумарні втрати тиску:

$$\Delta P_{total} = 15 + 146,8 + 40 + 20 = 221,8 \text{ Па}$$

Вибір вентилятора. Необхідна об'ємна витрата повітря: $V = 0,0304$ м³/с $\approx$ 110 м³/год. Необхідний тиск: $\Delta P_{total} \approx 220$ Па.

					14.17 - КР. 022.3.000 ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обираємо осьовий вентилятор з наступними характеристиками:

- продуктивність: 120–150 м³/год;
- напір: 250–300 Па;
- потужність електродвигуна: 40–60 Вт;
- напруга живлення: 12 В (від сонячної панелі) або 220 В.

Вентилятор встановлюється на виході з теплового акумулятора (перед сушильною камерою) для забезпечення примусової подачі нагрітого повітря.

Енергопостачання вентилятора. Для живлення вентилятора та системи автоматики доцільно використовувати фотоелектричну панель потужністю 50–100 Вт з акумуляторною батареєю 12 В, 40–60 А·год. Це забезпечує автономну роботу системи протягом доби без підключення до електромережі.

3.6 Конструктивне проєктування та тривимірне моделювання

Загальна конструктивна схема (рисунок 3.4). На основі виконаних розрахунків розроблено конструктивну схему сонячної сушарки з тепловим акумулятором, яка складається з таких основних елементів:

1. *Сонячний колектор* площею 3,5 м² з плоским абсорбером, односкловим покриттям та теплоізоляцією. Колектор встановлюється під кутом 30–45° до горизонту (оптимальний кут для літнього періоду в Україні).

2. *Тепловий акумулятор* об'ємом 1,5 м³ з галькою (фракція 15–25 мм) та інтегрованими РСМ-контейнерами з парафіном (50 кг). Акумулятор розміщується безпосередньо за колектором.

3. *Сушильна камера* з 6 лотками для продукції, загальною площею 2,1 м². Камера має теплоізоляцію та дверцята для завантаження.

4. *Повітропроводи* з'єднують колектор, акумулятор та сушильну камеру. Передбачено можливість байпасування акумулятора в денний час.

5. *Вентилятор* продуктивністю 120 м³/год, встановлений на виході з акумулятора.

					14.17 - КР. 022.3.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Система автоматики з датчиками температури та вологості для контролю процесу сушіння.

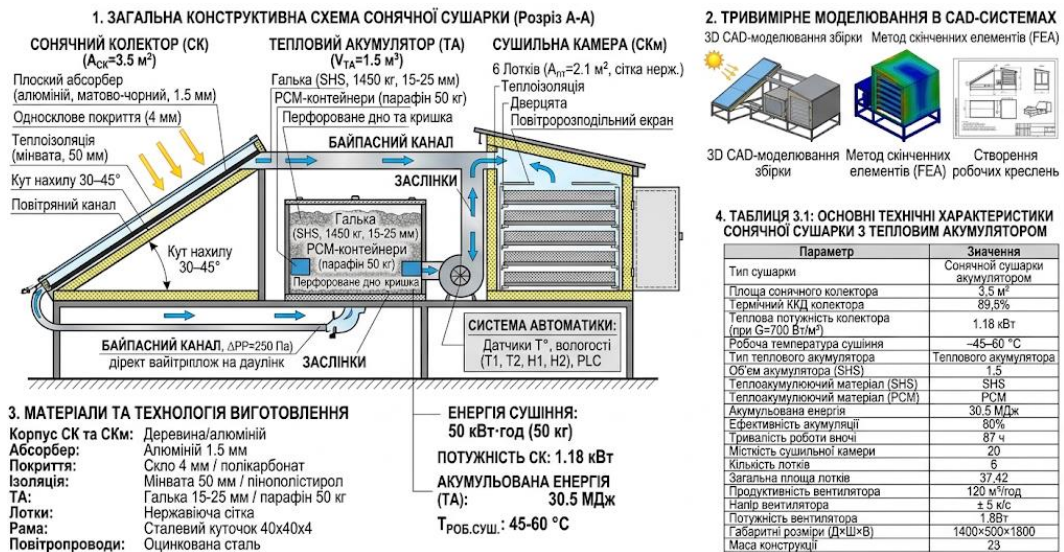


Рисунок 3.4 – Конструктивне проєктування та тривимірне моделювання сонячної сушарки

Тривимірне моделювання. Тривимірне моделювання сонячної сушарки виконується в системі автоматизованого проєктування (CAD) – SolidWorks, Autodesk Inventor або Kompas-3D. Моделювання дозволяє:

- візуалізувати конструкцію агрегату та окремих вузлів;
- перевірити взаємне розташування та спрацювання деталей;
- виконати розрахунки на міцність методом скінченних елементів (FEA);
- створити робочі креслення для виготовлення деталей.

Структура тривимірної моделі включає такі складальні одиниці:

1. *Колекторний блок:* корпус, абсорбер, скло, теплоізоляція, повітряні канали.
2. *Акумуляторний блок:* контейнер, галька, РСМ-контейнери, перфороване дно та кришка.
3. *Сушильна камера:* корпус з ізоляцією, лотки, дверцята, повітророзподільний екран.
4. *Вентиляційна система:* вентилятор, повітропроводи, заслінки, байпас.
5. *Рама:* несуча конструкція зі сталевих профілів.

Матеріали та технологія виготовлення. Для виготовлення сонячної сушарки рекомендуються такі матеріали:

- *Корпус колектора та камери:* деревина (сосна, модрина) або алюмінієвий профіль.
- *Абсорбер:* алюмінієвий лист 1,5 мм з матово-чорним покриттям.
- *Прозоре покриття:* скло 4 мм або полікарбонат.
- *Теплоізоляція:* мінеральна вата 50 мм або пінополістирол.
- *Тепловий акумулятор:* галька фракції 15–25 мм; парафін технічний (50 кг).
- *Лотки:* нержавіюча сітка з вічком 5–10 мм.
- *Рама:* сталевий куточок 40×40×4 мм.
- *Повітропроводи:* оцинкована сталь або алюмінієва гофра.

Результати виконаних розрахунків та конструктивного проектування зведено в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні технічні характеристики сонячної сушарки з тепловим акумулятором

Параметр	Значення
Тип сушарки	Непрямого нагріву з примусовою конвекцією
Площа сонячного колектора	3,5 м ² (2,5 × 1,4 м)
Термічний ККД колектора	48 %
Теплова потужність колектора (при G=700 Вт/м ²)	1,18 кВт
Робоча температура сушіння	45–60 °С
Тип теплового акумулятора	Комбінований SHS+PCM
Об'єм акумулятора (SHS)	1,5 м ³
Теплоакумулюючий матеріал (SHS)	Галька, 1450 кг
Теплоакумулюючий матеріал (PCM)	Парафін, 50 кг
Акумуляована енергія	30,5 МДж
Ефективність акумуляції	65 %
Тривалість роботи вночі	4–5 год
Місткість сушильної камери	50 кг свіжої продукції
Кількість лотків	6 шт.
Загальна площа лотків	2,1 м ²
Напір вентилятора	250 Па

Висновки

1. На основі теоретичних залежностей, отриманих у розділі 2, виконано інженерні розрахунки основних конструктивних та технологічних параметрів сонячної сушарки з тепловим акумулятором. Визначено необхідну кількість теплової енергії для сушіння 50 кг продукції – 50 кВт·год, площу сонячного колектора – 3,5 м², теплову потужність колектора – 1,18 кВт.

2. Розраховано параметри теплового акумулятора: об'єм – 1,5 м³, маса гальки – 1450 кг, акумуляована енергія – 30,5 МДж. Додаткове використання 50 кг парафіну як фазоперехідного матеріалу забезпечує стабілізацію температури розрядження та підвищення ефективності акумуляції. Тривалість роботи сушарки в нічний час становить 4–5 годин, що забезпечує безперервність процесу сушіння.

3. Визначено конструктивні параметри сушильної камери: 6 лотків загальною площею 2,1 м², об'єм камери – 0,672 м³. Розраховано витрату повітря – 110 м³/год та втрати тиску в системі – 220 Па, що дозволило обґрунтовано вибрати вентилятор продуктивністю 120 м³/год та напором 250 Па.

4. Розроблено конструктивну схему сонячної сушарки, яка включає плоский сонячний колектор, комбінований SHS-PCM тепловий акумулятор, сушильну камеру з лотками, вентиляційну систему та систему автоматики. Запропоновано матеріали для виготовлення основних вузлів.

5. Отримані технічні характеристики спроектованої сонячної сушарки (габарити 2,8 × 1,8 × 1,6 м, маса ~250 кг) роблять її придатною для використання в фермерських та особистих селянських господарствах. Установка забезпечує сушіння 50 кг продукції за 2–3 дні з використанням відновлюваної сонячної енергії, що дозволяє суттєво знизити енергозатрати порівняно з традиційними електричними та газовими сушарками.

					14.17 - КР. 022.3.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПРИ РОБОТІ З СОНЯЧНОЮ СУШАРКОЮ З ТЕПЛОВИМ АКУМУЛЯТОРОМ

4.1 Нормативно-правова база охорони праці в сільськогосподарському виробництві

Законодавчі основи охорони праці в Україні. Охорона праці під час експлуатації сільськогосподарського обладнання, зокрема сонячних сушарок з тепловими акумуляторами, регламентується низкою нормативно-правових актів України. Фундаментальним документом є *Закон України «Про охорону праці»*, який визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності. Закон встановлює обов'язки роботодавця щодо створення безпечних умов праці, проведення інструктажів, навчання та перевірки знань з охорони праці, а також забезпечення працівників засобами індивідуального захисту.

Основним галузевим нормативним документом є *Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві* (НПАОП 01.0-1.02-18), затверджені наказом Міністерства соціальної політики України від 29.08.2018 № 1240. Ці правила встановлюють єдині вимоги безпеки праці під час виконання технологічних процесів у сільськогосподарському виробництві, включаючи вимоги до обладнання, територій, виробничих приміщень, організації робочих місць та застосування засобів індивідуального захисту. Правила поширюються на всіх суб'єктів господарювання незалежно від форми власності та організаційно-правової форми, які провадять діяльність у сільськогосподарському виробництві.

					14.17 - КР.023.4.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4			
Розроб.		Тарасов Д.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						61	20	

Міжнародні стандарти безпеки обладнання. При проєктуванні та експлуатації сонячних сушарок необхідно керуватися міжнародними стандартами безпеки машин. Основним з них є *ДСТУ EN ISO 12100:2014 «Безпечність машин. Загальні принципи розрахунку. Оцінка ризиків і зниження ризиків»*. Цей стандарт визначає загальні принципи техніки безпеки та оцінки ризиків, допомагає виявити та усунути небезпеку на різних стадіях життєвого циклу машини.

Для сільськогосподарських машин діють також спеціалізовані стандарти серії *ДСТУ EN ISO 4254*, які встановлюють конкретні вимоги безпеки для різних типів сільськогосподарської техніки. Відповідно до цих стандартів, вузли та елементи машин, що рухаються, обертаються та можуть становити небезпеку, мають бути огорожені захисними кожухами.

Вимоги до безпеки виробничих процесів. Безпека виробничих процесів післязбиральної доробки сільськогосподарської продукції повинна бути забезпечена вибором технологічних процесів, прийомів, режимів роботи й відповідного обладнання. Основні вимоги включають:

- унеможливлення контакту працівників з небезпечними зонами обладнання;
- застосування засобів колективного та індивідуального захисту;
- дотримання режимів праці та відпочинку;
- проведення регулярних медичних оглядів персоналу;
- наявність первинних засобів пожежогасіння.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при роботі з сонячною сушаркою

Класифікація небезпечних та шкідливих факторів (рисунок 4.1). При роботі з сонячною сушаркою з тепловим акумулятором виникають такі основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

Фізичні небезпечні фактори:

					14.17 - КР. 022.4.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- *термічні фактори* — можливість опіків при контакті з нагрітими поверхнями сонячного колектора (температура абсорбера може досягати 80–100 °C), теплового акумулятора та повітропроводів (температура повітря 45–60 °C);
- *електричні фактори* — ураження електричним струмом при роботі з вентилятором, системою автоматики та фотоелектричною панеллю (напруга 12–220 В);
- *механічні фактори* — рухомі частини вентилятора, можливість травмування при переміщенні та встановленні важких елементів конструкції (маса сушарки ~250 кг);
- *пожежна небезпека* — можливість займання дерев'яних елементів конструкції при перегріві або короткому замиканні;
- *підвищений рівень шуму* — шум від роботи вентилятора (до 60–70 дБА);
- *несприятливі метеорологічні умови* — робота на відкритому повітрі вплив високих/низьких температур, сонячної радіації, опадів, вітру;
- *робота на висоті* — при обслуговуванні верхніх частин конструкції.



Рисунок 4.1 – Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при роботі з сонячною сушаркою

Хімічні та біологічні шкідливі фактори:

- можливість контакту з фазоперехідним матеріалом (парафін) при пошкодженні герметичних контейнерів;
- органічний пил від продукції, що сушиться (алергени);
- можливість розвитку плісняви та грибків при порушенні режимів сушіння.

Психофізіологічні фактори:

- напруженість праці, пов'язана з необхідністю контролю параметрів сушіння;
- монотонність роботи при тривалих циклах сушіння;
- робота на відкритому повітрі в спекотну погоду (тепловий стрес).

Термічні небезпеки та захист від опіків

Найбільш суттєвою небезпекою при роботі з сонячною сушаркою є можливість термічних опіків. Температура поверхні сонячного колектора в пікові сонячні години може досягати 80–100 °С, що при контакті зі шкірою протягом 1–3 секунд може викликати опік другого ступеня. Температура повітря в сушильній камері становить 45–60 °С, що також може спричинити дискомфорт та опіки при тривалому контакті.

Для захисту від термічних небезпек необхідно:

- нанести на гарячі поверхні попереджувальні знаки «Обережно, гаряча поверхня!»;
- використовувати теплоізоляцію на зовнішніх поверхнях колектора та повітропроводів;
- застосовувати захисні екрани в зонах можливого контакту;
- використовувати термостійкі рукавиці при обслуговуванні;
- проводити роботи з обслуговування в ранкові або вечірні години, коли температура поверхонь нижча.

Електробезпека при роботі з сонячною сушаркою.

Сонячна сушарка з тепловим акумулятором може бути оснащена вентилятором з електроприводом, системою автоматики (датчики температури,

					14.17 - КР. 022.4.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вологості, контролер) та фотоелектричною панеллю для автономного живлення. Вимоги безпеки під час експлуатації сонячного обладнання визначаються вимогами електробезпеки.

Основні заходи електробезпеки:

- всі електроспоживачі повинні мати захисне заземлення;
- електропроводка повинна бути виконана в подвійній ізоляції або в гофрованих трубах;
- з'єднання проводів повинні бути надійно ізольовані та розміщені в герметичних розподільних коробках;
- фотоелектрична панель повинна бути захищена від механічних пошкоджень;
- акумуляторна батарея повинна розміщуватися у вентильованому, захищеному від прямих сонячних променів місці;
- при роботах з електрообладнанням необхідно використовувати діелектричні рукавиці та інструмент з ізольованими ручками.

Механічні небезпеки

Механічні небезпеки пов'язані з наявністю рухомих частин (вентилятор) та значними габаритами та масою конструкції. Маса сонячної сушарки становить приблизно 250 кг, що вимагає обережності при переміщенні та встановленні.

Заходи безпеки:

- вентилятор повинен бути обладнаний захисною решіткою, що унеможливило б контакт з лопатями;
- конструкція повинна бути стійкою до вітрових навантажень (встановлення на рівному майданчику з додатковим кріпленням);
- важкі елементи конструкції повинні підніматися з використанням вантажопідійомних механізмів або не менш ніж двома працівниками;
- гострі кути та кромки повинні бути затуплені або закриті захисними накладками.

Пожежна безпека

Сонячна сушарка може створювати пожежну небезпеку внаслідок:

					14.17 - КР. 022.4.000 ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- перегріву дерев'яних елементів конструкції при порушенні теплоізоляції;
- короткого замикання в електропроводці;
- займання сухої продукції при перевищенні допустимої температури сушіння.
- Заходи пожежної безпеки:
 - дерев'яні елементи конструкції повинні бути просочені антипіренами;
 - електропроводка повинна бути виконана з дотриманням вимог пожежної безпеки;
- поблизу сушарки встановлюють первинні засоби пожежогасіння відповідно до вимог Правил пожежної безпеки в Україні;
- сушарка повинна встановлюватися на відстані не менше 5 м від легкозаймистих матеріалів та будівель;
- процес сушіння повинен контролюватися для запобігання перегріву продукції.

4.3 Засоби колективного та індивідуального захисту

Засоби колективного захисту [20].

До засобів колективного захисту при роботі з сонячною сушаркою належать:

- *теплоізоляція* гарячих поверхонь (колектор, повітропроводи, акумулятор) для зменшення ризику опіків та теплових втрат;
- *захисні екрани та огороження* рухомих частин (вентилятор);
- *попереджувальні знаки* та написи на небезпечних ділянках;
- *система вентиляції* робочої зони для відведення надлишкового тепла та вологості;
- *система автоматичного контролю* температури з функцією аварійного вимкнення;

					14.17 - КР. 022.4.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- захисне заземлення електрообладнання;
 - вогнегасник (порошковий або вуглекислотний) в зоні роботи сушарки.
- Засоби індивідуального захисту [22].

Персонал, який обслуговує сонячну сушарку, повинен бути забезпечений такими засобами індивідуального захисту:

- *термостійкі рукавиці* — для захисту рук від опіків при контакті з нагрітими поверхнями;
- *захисні окуляри або маска* — для захисту очей від пилу, можливих викидів гарячого повітря та сонячного випромінювання;
- *головний убір* — для захисту від сонячного удару та перегріву;
- *спецодяг* (бавовняний комбінезон або костюм) — для захисту шкіри;
- *респіратор* — при роботі в умовах підвищеної запиленості;
- *взуття з протиковзкою підошвою* — для запобігання падінням.

4.4 Вимоги безпеки під час експлуатації сонячної сушарки

Вимоги до місця встановлення [12].

Сонячна сушарка повинна встановлюватися з дотриманням таких вимог:

- рівний, твердий майданчик з доброю вентиляцією;
- орієнтація колектора на південь (для Північної півкулі) під кутом 30–45° до горизонту;
- відсутність затінення від дерев, будівель та інших об'єктів протягом світлового дня;
- відстань від легкозаймистих матеріалів та будівель — не менше 5 м;
- зручний доступ для завантаження, вивантаження та обслуговування.

Вимоги перед початком роботи [13].

Перед початком роботи необхідно:

1. Переконатися у справності всіх вузлів та елементів конструкції.
2. Перевірити герметичність контейнерів з фазоперехідним матеріалом (парафін).

					14.17 - КР. 022.4.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Переконалися у відсутності пошкоджень скла колектора.
4. Перевірити надійність кріплення всіх елементів.
5. Переконалися у справності електропроводки та захисного заземлення.
6. Перевірити наявність та справність засобів пожежогасіння.
7. Провести інструктаж з охорони праці для всіх задіяних осіб.
8. Ознайомитися з погодним прогнозом для планування режиму роботи.

Вимоги під час роботи [14].

Під час роботи забороняється:

- торкатися до нагрітих поверхонь без термостійких рукавиць;
- залишати працюючу сушарку без нагляду на тривалий час;
- перевищувати встановлену максимальну температуру сушіння (70 °C);
- завантажувати продукцію з вологістю, що перевищує допустиму;
- перебувати в безпосередній близькості від гарячих поверхонь у спекотну погоду без головного убору;
- проводити ремонтні роботи на працюючій сушарці;
- допускати до роботи сторонніх осіб, особливо дітей.

Вимоги після закінчення роботи [14].

Після закінчення роботи необхідно:

- вимкнути вентилятор та систему автоматики;
- дочекатися охолодження гарячих поверхонь (при необхідності);
- вивантажити готову продукцію;
- очистити лотки від залишків продукції;
- провести візуальний огляд конструкції;
- за необхідності — провести технічне обслуговування згідно з регламентом.

					14.17 - КР. 022.4.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.5 Екологічна безпека використання сонячної сушарки з тепловим акумулятором

Екологічні переваги сонячного сушіння (рисунок 4.2). Сонячні сушарки з тепловими акумуляторами є екологічно чистими установками, оскільки використовують відновлювану сонячну енергію. Сонячна енергія є невичерпною, ефективною та безпечною для навколишнього середовища. Основні екологічні переваги:

- *відсутність викидів парникових газів* у процесі експлуатації. На відміну від електричних або газових сушарок, сонячна сушарка не виробляє викидів вуглекислого газу в атмосферу;
- *заміщення викопного палива* — використання сонячної енергії дозволяє зменшити споживання природного газу, електроенергії та інших невідновлюваних джерел енергії;
- *зменшення післязбиральних втрат* — своєчасне сушіння дозволяє зберегти до 30–50 % врожаю, що зменшує відходи та пов'язаний з ними негативний вплив на довкілля;
- *відсутність викидів шкідливих речовин* — сонячні сушарки працюють безшумно та не виробляють токсичних викидів.

					14.17 - КР. 022.4.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

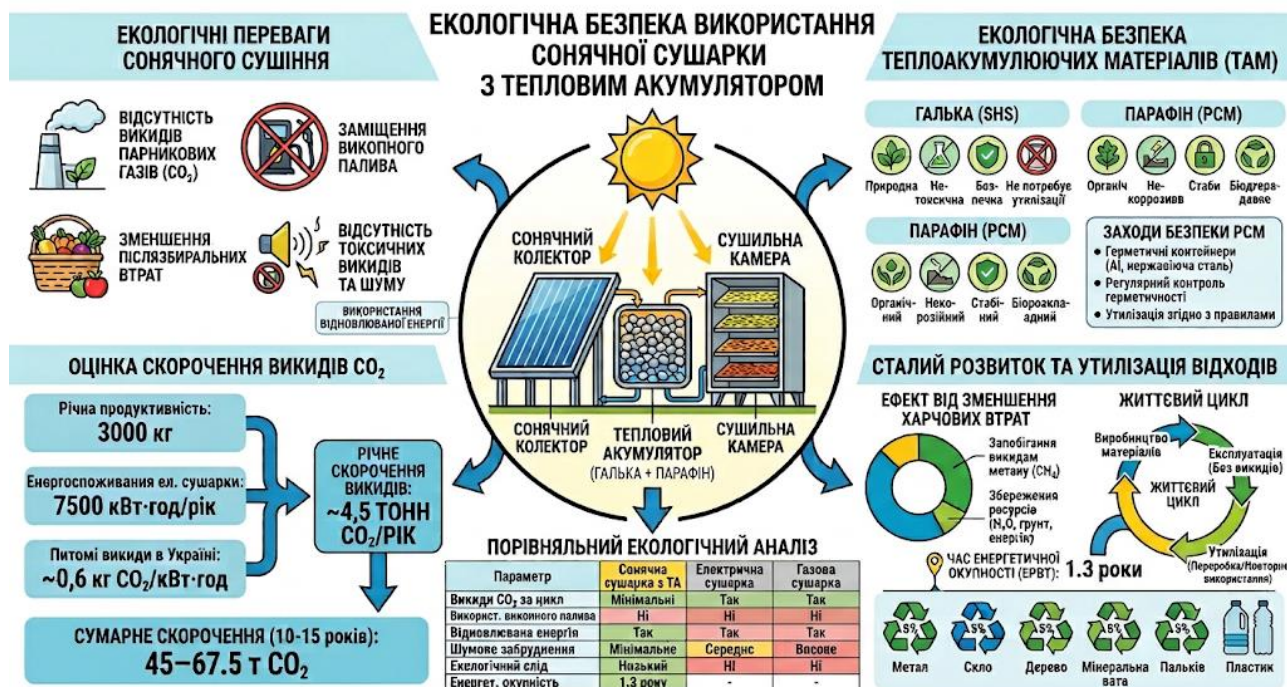


Рисунок 4.2 – Екологічна безпека використання сонячної сушарки

Використання сонячної енергії в сільському господарстві дозволяє отримувати енергію, що не шкодить навколишньому середовищу. Сонячні установки є екологічно чистими та сприяють сталому розвитку агропромислового комплексу.

Оцінка скорочення викидів CO_2

Використання сонячних сушарок з тепловими акумуляторами дозволяє суттєво скоротити викиди парникових газів порівняно з традиційними методами сушіння. Екологічний аналіз показує, що сонячні сушарки з комбінованим акумулюванням чутливого та прихованого тепла мають значний потенціал пом'якшення викидів CO_2 .

Розрахунок скорочення викидів CO_2 при використанні сонячної сушарки замість електричної:

- Річна продуктивність сушарки: 3000 кг сухої продукції.
- Енергоспоживання електричної сушарки: 2,5 кВт·год/кг сухої продукції.
- Річне енергоспоживання електричної сушарки: $3000 \cdot 2,5 = 7500$ кВт·год.
- Питомі викиди CO_2 при виробництві електроенергії в Україні: ~0,6 кг CO_2 /кВт·год.

– Річні викиди CO₂ при використанні електричної сушарки: $7500 \cdot 0,6 = 4500$ кг CO₂/рік.

– Скорочення викидів CO₂ при використанні сонячної сушарки: ~4,5 т CO₂/рік.

За період експлуатації 10–15 років сумарне скорочення викидів CO₂ становить 45–67,5 т. Це узгоджується з дослідженнями, які оцінюють потенціал зменшення викидів CO₂ сонячними сушарками на рівні 83,97 т на рік.

Екологічна безпека теплоакумуючих матеріалів

При використанні теплових акумуляторів важливим аспектом є екологічна безпека матеріалів.

Галька (SHS) — природний матеріал, екологічно безпечний, не виділяє токсичних речовин, не потребує спеціальної утилізації. Використання гальки як теплоакумуючого матеріалу не створює екологічних ризиків.

Парафін (PCM) — органічний матеріал, який зазвичай є нетоксичним, не корозійним, стабільним, має тривалий термін зберігання, високу ефективність накопичення та повністю оборотний. При пошкодженні герметичних контейнерів парафін може потрапити в навколишнє середовище, однак він є біорозкладним та не становить значної екологічної небезпеки. Корозійні випробування PCM підтверджують їх хімічну та термічну стабільність.

Для забезпечення екологічної безпеки PCM необхідно:

- використовувати герметичні контейнери з корозійностійких матеріалів (алюміній, нержавіюча сталь);
- забезпечити регулярний контроль герметичності контейнерів;
- при пошкодженні контейнера провести збір та утилізацію парафіну згідно з правилами поводження з відходами.

Сталий розвиток та сонячні сушарки.

Інтеграція теплових акумуляторів у сонячні сушарки сприяє сталому розвитку агропромислового комплексу. Оцінки стійкості демонструють, що інтеграція як чутливого, так і прихованого теплового акумулювання покращує

					14.17 - КР. 022.4.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання енергії, мінімізуючи втрати, що підвищує загальну стійкість та продуктивність сонячної сушарки.

Використання сонячних сушарок з РСМ забезпечує кращу загальну ефективність та зменшує екологічний вплив. Сонячні сушарки досягають кращої загальної ефективності при використанні систем акумуляції тепла. Показники стійкості покращуються при використанні РСМ.

Сонячні сушарки з тепловими акумуляторами є екологічно безпечними, оскільки:

- не забруднюють продукти та навколишнє середовище;
- використовують відновлювану енергію без викидів шкідливих речовин;
- сприяють зменшенню залежності від викопного палива;
- зменшують кількість харчових відходів завдяки збереженню продукції;
- мають низький екологічний слід протягом всього життєвого циклу.

Утилізація відходів та матеріалів після закінчення терміну служби

Після закінчення терміну служби сонячної сушарки (10–15 років) необхідно провести утилізацію матеріалів з дотриманням екологічних вимог:

- *металеві елементи* (рама, абсорбер) — підлягають вторинній переробці як брухт чорних та кольорових металів;
- *скло* — може бути перероблене або використане повторно;
- *дерев'яні елементи* — можуть бути використані як паливо або перероблені на деревні відходи;
- *теплоізоляція* (мінеральна вата) — утилізується згідно з правилами поводження з будівельними відходами;
- *галька* — може бути використана повторно в інших будівельних або ландшафтних цілях;
- *парафін (PCM)* — може бути перероблений або використаний повторно за умови збереження властивостей.

					14.17 - КР. 022.4.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Екологічний аналіз впливу сонячної сушарки на довкілля.

Життєвий цикл сонячної сушарки.

Екологічний вплив сонячної сушарки з тепловим акумулятором необхідно оцінювати протягом всього життєвого циклу: виробництво матеріалів, виготовлення, транспортування, експлуатація, технічне обслуговування та утилізація.

Етап виробництва: виготовлення сонячного колектора, теплового акумулятора та сушильної камери потребує енергетичних та матеріальних ресурсів. Однак енергія, витрачена на виробництво, окупається протягом 1–2 років експлуатації (Energy Payback Time становить 1,278 року).

Етап експлуатації: сонячна сушарка не виробляє викидів шкідливих речовин, не споживає викопне паливо, не створює шумового забруднення.

Етап утилізації: більшість матеріалів підлягають вторинній переробці, що мінімізує кількість відходів.

Скорочення викидів вуглецю та вуглецевий кредит.

Екологічний аналіз сонячних сушарок оцінює потенціал зменшення викидів CO₂. Для сонячних сушарок з інтеграцією систем акумуляції тепла викиди CO₂ за період експлуатації 35 років становлять 22,99 кг/рік при масовій витраті повітря 0,06 кг/с, а потенціал зменшення викидів оцінюється в 650 кг CO₂. Вуглецевий кредит, який може бути отриманий, оцінюється в 108,27–433,08 доларів США.

Для розробленої сонячної сушарки потужністю 1,18 кВт та річною продуктивністю 3000 кг сухої продукції скорочення викидів CO₂ становить ~4,5 т/рік. За 15 років експлуатації сумарне скорочення викидів становить ~67,5 т CO₂.

Зменшення харчових відходів та їх екологічний ефект.

Післязбиральні втрати плодоовочевої продукції є значущим екологічним фактором. Розкладання харчових відходів на звалища призводить до викидів метану (CH₄), парниковий ефект якого у 25 разів вищий, ніж у CO₂. Своєчасне

					14.17 - КР. 022.4.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сушіння продукції дозволяє зберегти до 40 % врожаю, що запобігає утворенню харчових відходів та пов'язаних з ними викидів парникових газів.

Екологічний ефект від зменшення харчових відходів (таблиця 4.1):

- Запобігання викидам метану при розкладанні органічних відходів.
- Зменшення потреби у виробництві додаткової продукції для заміщення втраченої.
- Збереження природних ресурсів (вода, ґрунт, енергія), використаних для вирощування втраченої продукції.

Таблиця 4.1 – Порівняльний екологічний аналіз методів сушіння

Параметр	Сонячна сушарка з ТА	Електрична сушарка	Газова сушарка
Викиди CO ₂ за цикл сушіння	0 кг	~15 кг	~8 кг
Використання викопного палива	Ні	Так	Так
Відновлювана енергія	Так	Ні	Ні
Шумове забруднення	Мінімальне	Середнє	Високе
Екологічний слід	Низький	Високий	Високий
Енергетична окупність	1,3 року	—	—

Сонячна сушарка з тепловим акумулятором має найнижчий екологічний вплив порівняно з альтернативними методами сушіння, що робить її найбільш екологічно прийнятним вибором для сільськогосподарських підприємств.

1. Використання сонячних сушарок з тепловими акумуляторами сприяє сталому розвитку агропромислового комплексу, зменшує залежність від викопного палива, скорочує харчові відходи та їх екологічний вплив. Інтеграція систем акумуляції тепла покращує енергоефективність та загальну стійкість системи сушіння, що підтверджується показниками стійкості та екологічними оцінками.

2. Рекомендовано впровадження сонячних сушарок з тепловими акумуляторами в фермерських та особистих селянських господарствах як екологічно безпечної та енергоефективної альтернативи традиційним методам сушіння. При цьому необхідно забезпечити дотримання всіх вимог охорони праці та екологічної безпеки на всіх етапах життєвого циклу установки.

Висновки

1. Охорона праці при роботі з сонячною сушаркою з тепловим акумулятором регламентується Законом України «Про охорону праці» та Правилами охорони праці у сільськогосподарському виробництві (НПАОП 01.0-1.02-18). При проектуванні обладнання необхідно керуватися міжнародними стандартами безпеки машин, зокрема ДСТУ EN ISO 12100:2014.

2. Основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами при роботі з сонячною сушаркою є: термічні фактори (температура поверхонь до 100 °С, повітря до 70 °С), електричні фактори (напруга 12–220 В), механічні фактори (рухомі частини вентилятора, велика маса конструкції ~250 кг), пожежна небезпека, підвищений рівень шуму (до 70 дБА) та несприятливі метеорологічні умови.

3. Для забезпечення безпечної роботи необхідно використовувати засоби колективного захисту (теплоізоляція, захисні екрани, попереджувальні знаки, заземлення, вогнегасник) та індивідуального захисту (термостійкі рукавиці, захисні окуляри, спецодяг, респіратор). Вимоги безпеки охоплюють всі етапи роботи — від встановлення до технічного обслуговування.

4. Сонячна сушарка з тепловим акумулятором є екологічно чистою установкою, що використовує відновлювану сонячну енергію. Вона не виробляє викидів парникових газів та шкідливих речовин у процесі експлуатації. Річне скорочення викидів CO₂ становить ~4,5 т, за 15 років експлуатації — ~67,5 т.

5. Теплоакumuлюючі матеріали (галька, парафін) є екологічно безпечними. Галька є природним матеріалом, що не потребує спеціальної утилізації. Парафін є нетоксичним, хімічно стабільним, біорозкладним матеріалом за умови використання герметичних контейнерів.

					14.17 - КР. 022.4.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОЄКТУ

5.1 Загальні положення

Метою даного розділу є комплексна оцінка економічної ефективності проєкту сонячної сушарки з комбінованим тепловим акумулятором (SHS + PCM) для плодоовочевої продукції, розробленої в розділах 2–4. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити склад капітальних витрат на виготовлення та монтаж установки;
- розрахувати річні експлуатаційні витрати;
- оцінити річний економічний ефект від впровадження;
- розрахувати показники економічної ефективності (NPV, PI, IRR, ROI, термін окупності);
- виконати аналіз чутливості проєкту до зміни ключових параметрів;
- порівняти розроблену установку з альтернативними варіантами сушіння;
- оцінити соціальний та екологічний ефекти;
- сформулювати висновки щодо доцільності впровадження.

Об'єктом економічної оцінки є сонячна сушарка непрямого нагріву з плоским сонячним колектором площею 3,5 м², комбінованим тепловим акумулятором (1450 кг гальки + 50 кг парафіну) та сушильною камерою місткістю 50 кг свіжої продукції. Технічні характеристики установки наведено в таблиці 3.1 розділу 3.

					14.17 - КР.022.5.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 5			
Розроб.		Тарасов Д.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						20	76	

Методичною базою розрахунків є загальноприйняті в Україні та міжнародній практиці методи оцінки ефективності інвестиційних проєктів, зокрема: метод дисконтування грошових потоків (DCF), розрахунок чистого приведенного доходу (NPV), індексу рентабельності (PI), внутрішньої норми дохідності (IRR), періоду окупності (PP) та дисконтованого періоду окупності (DPP). Розрахунки виконуються в постійних цінах станом на 2026 рік.

5.2 Вихідні дані для розрахунку

Для виконання техніко-економічного обґрунтування використано такі групи вихідних даних:

1. Технічні параметри установки – отримані в результаті інженерних розрахунків (розділ 3) та конструктивного проєктування.

2. Ринкові ціни на матеріали та комплектуючі – станом на 2026 рік, за даними постачальників будівельних матеріалів, металовиробів та комплектуючих.

3. Тарифи на енергоносії – за даними НКРЕКП та регіональних енергопостачальних компаній.

4. Ціни на плодоовочеву продукцію – за даними Державної служби статистики України та аграрних бірж.

5. Нормативні дані – щодо норм амортизації, відрахувань на ремонт та обслуговування, ставок дисконтування.

Технічні характеристики об'єкта (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Основні технічні характеристики сонячної сушарки з тепловим акумулятором

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
1	2	3	4
Площа сонячного колектора	A_c	3,5	м ²

					14.17 - КР. 022.5.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
1	2	3	4
Термічний ККД колектора	η_c	0,48	—
Теплова потужність колектора (при $G = 700 \text{ Вт/м}^2$)	Q_u	1,18	кВт
Робоча температура сушіння	$T_{\text{суш}}$	45–60	°С
Об'єм теплового акумулятора	V_{storage}	1,5	м³
Маса гальки (SHS)	m_s	1450	кг
Маса парафіну (PCM)	m_{PCM}	50	кг
Акумуляована енергія	Q_{storage}	30,5	МДж
Тривалість роботи вночі	t_{night}	4–5	год
Місткість сушильної камери	m_{fresh}	50	кг
Кількість лотків	n_{trays}	6	шт.
Продуктивність вентилятора	V_{fan}	120	м³/год
Потужність вентилятора	P_{fan}	50	Вт
Габаритні розміри (Д×Ш×В)	—	2,8×1,8×1,6	м
Маса конструкції	M	~250	кг
Річна продуктивність (суха продукція)	M_{dry}	3000	кг

Економічні показники та ціни (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 – Економічні показники для розрахунку (станом на 2026 рік)

Показник	Позначення	Значення	Джерело
1	2	3	4
Ціна реалізації 1 кг сушеної продукції (яблука)	$\text{Ц}_{\text{сух}}$	350 грн	Аграрна біржа
Ціна свіжої продукції (яблука)	$\text{Ц}_{\text{свіж}}$	25 грн/кг	Ринкові дані
Тариф на електроенергію	$T_{\text{ел}}$	4,32 грн/кВт·год	НКРЕКП

					14.17 - КР. 022.5.000 ПЗ	Аркуш 78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Показник	Позначення	Значення	Джерело
1	2	3	4
Ціна природного газу	$C_{\text{газ}}$	8,5 грн/м³	Ринкові дані
Ставка дисконтування	r	15 %	Експертна оцінка
Норма амортизації	$N_{\text{ам}}$	10 %	Податковий кодекс
Ставка ЄСВ	—	22 %	Законодавство
Мінімальна зарплата	$ЗП_{\text{мін}}$	8000 грн	Законодавство
Вартість 1 люд-год роботи оператора	$V_{\text{люд-год}}$	120 грн	Розрахунково
Горизонт планування	T	10 років	Прийнято

5.3 Методика розрахунку техніко-економічних показників

Розрахунок капітальних витрат

Капітальні витрати (CAPEX) на виготовлення та монтаж сонячної сушарки включають:

$$K = K_{\text{кол}} + K_{\text{ак}} + K_{\text{кам}} + K_{\text{вент}} + K_{\text{авт}} + K_{\text{монт}} + K_{\text{інш}}, \quad (5.1)$$

де: $K_{\text{кол}}$ – витрати на сонячний колектор; $K_{\text{ак}}$ – витрати на тепловий акумулятор; $K_{\text{кам}}$ – витрати на сушильну камеру; $K_{\text{вент}}$ – витрати на вентиляційну систему; $K_{\text{авт}}$ – витрати на систему автоматики; $K_{\text{монт}}$ – витрати на монтаж та налагодження; $K_{\text{інш}}$ – інші витрати (транспортні, непередбачені).

Розрахунок річних експлуатаційних витрат.

Річні експлуатаційні витрати (OPEX) включають:

$$C_{\text{річ}} = C_{\text{ам}} + C_{\text{ел}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{інш}}, \quad (5.2)$$

де: $C_{\text{ам}}$ – амортизаційні відрахування; $C_{\text{ел}}$ – витрати на електроенергію для вентилятора та автоматики; $C_{\text{рем}}$ – витрати на ремонт та технічне

обслуговування; $C_{зп}$ – витрати на оплату праці оператора; $C_{інш}$ – інші витрати (витратні матеріали, страхування).

Амортизаційні відрахування розраховуються за прямолінійним методом:

$$C_{ам} = \frac{K \cdot N_{ам}}{100} \quad (5.3)$$

Витрати на електроенергію:

$$C_{ел} = P_{вент} \cdot t_{роб} \cdot T_{ел} \cdot k_{вик}, \quad (5.4)$$

де $t_{роб}$ – річний час роботи вентилятора (год); $k_{вик}$ – коефіцієнт використання.

Розрахунок річного економічного ефекту

Річний економічний ефект від впровадження сонячної сушарки формується за рахунок:

1. Зниження енерговитрат порівняно з традиційними сушарками (електричними або газовими).
2. Зменшення післязбиральних втрат завдяки своєчасному сушінню.
3. Підвищення якості продукції та можливості реалізації за вищою ціною.
4. Зниження витрат на оплату праці завдяки автоматизації процесу.

Річний економічний ефект:

$$E_{річ} = E_{ен} + E_{втр} + E_{як} + E_{зп}, \quad (5.5)$$

де: $E_{ен}$ – економія на енергоносіях; $E_{втр}$ – ефект від зменшення втрат продукції; $E_{як}$ – ефект від підвищення якості; $E_{зп}$ – економія на оплаті праці.

Економія на енергоносіях:

$$E_{ен} = (Q_{ел.суш} \cdot T_{ел} - Q_{сонц} \cdot 0) \cdot M_{річ}, \quad (5.6)$$

де $Q_{ел.суш}$ – питоме енергоспоживання електричної сушарки (кВт·год/кг);
 $Q_{сонц}$ – енергоспоживання сонячної сушарки (тільки вентилятор).

Ефект від зменшення втрат:

					14.17 - КР. 022.5.000 ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{\text{втр}} = M_{\text{свіж}} \cdot (k_{\text{втр.баз}} - k_{\text{втр.проект}}) \cdot \Pi_{\text{сух}} \cdot K_{\text{перер}}, \quad (5.7)$$

де $M_{\text{свіж}}$ – маса свіжої продукції; $k_{\text{втр.баз}}$, $k_{\text{втр.проект}}$ – коефіцієнти втрат;
 $K_{\text{перер}}$ – коефіцієнт перерахунку свіжої продукції на суху.

Розрахунок показників ефективності інвестицій

Чистий приведений дохід (NPV):

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - K, \quad (5.8)$$

де CF_t – чистий грошовий потік у році t ; r – ставка дисконтування; T – горизонт планування; K – капітальні витрати.

Індекс рентабельності інвестицій (PI):

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}}{K}. \quad (5.9)$$

Внутрішня норма дохідності (IRR):

$$NPV(IRR) = 0. \quad (5.10)$$

Період окупності (PP):

$$PP = \frac{K}{CF_{\text{сеп}}}. \quad (5.11)$$

Дисконтований період окупності (DPP):

$$DPP = \min \left\{ t: \sum_{i=1}^t \frac{CF_i}{(1+r)^i} \geq K \right\}. \quad (5.12)$$

Рентабельність інвестицій (ROI):

$$ROI = \frac{E_{\text{річ}}}{K} \cdot 100\%. \quad (5.13)$$

5.4 Розрахунок капітальних витрат

Витрати на сонячний колектор (таблиця 5.3).

Таблиця 5.3 – Калькуляція витрат на сонячний колектор (3,5 м²)

Найменування	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
1	2	3	4
Алюмінієвий лист (абсорбер), 1,5 мм	3,5 м ²	450	1575
Скло низькозалістисте, 4 мм	3,7 м ²	350	1295
Алюмінієвий профіль (корпус)	12 м	180	2160
Мінеральна вата, 50 мм	4 м ²	120	480
Матово-чорна фарба (абсорбер)	0,5 л	280	140
Кріпильні елементи	—	—	350
Разом			6000

Витрати на тепловий акумулятор (таблиця 5.4).

Таблиця 5.4 – Калькуляція витрат на тепловий акумулятор

Найменування	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
1	2	3	4
Галька (фракція 15–25 мм)	1450 кг	2,5	3625
Парафін технічний (Тпл = 52 °С)	50 кг	120	6000
Алюмінієві труби (контейнери РСМ)	15 шт.	85	1275
Металевий контейнер (корпус)	1 шт.	3500	3500
Перфороване дно та кришка	1 компл.	800	800
Теплоізоляція	2 м ²	150	300
Разом			15500

Витрати на сушильну камеру (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 – Калькуляція витрат на сушильну камеру

Найменування	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
1	2	3	4
Дерев'яний брус (каркас)	0,15 м³	3500	525
Мінеральна вата, 50 мм	6 м²	120	720
Нержавіюча сітка (лотки)	2,1 м²	450	945
Фанера/OSB (обшивка)	4 м²	280	1120
Дверцята з ущільнювачем	1 шт.	800	800
Кріпильні елементи	—	—	400
Разом			4510

Витрати на вентиляційну систему та автоматику (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6 – Калькуляція витрат на вентиляцію та автоматику

Найменування	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
1	2	3	4
Вентилятор осьовий (120 м³/год, 50 Вт)	1 шт.	1200	1200
Повітропроводи (гофра)	3 м	150	450
Заслінки та байпас	1 компл.	600	600
Фотоелектрична панель, 100 Вт	1 шт.	2500	2500
Акумуляторна батарея, 12 В, 60 А·год	1 шт.	2800	2800
Контролер заряду	1 шт.	900	900
Датчики температури та вологості	2 шт.	350	700
Блок автоматики (PLC)	1 шт.	1500	1500
Разом			10650

Зведена калькуляція капітальних витрат (таблиця 5.7).

Таблиця 5.7 – Зведена калькуляція капітальних витрат

Стаття витрат	Сума, грн	Питома вага, %
1	2	3
Сонячний колектор	6000	15,0

					14.17 - КР. 022.5.000 ПЗ	Аркуш 83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Стаття витрат	Сума, грн	Питома вага, %
1	2	3
Тепловий акумулятор	15500	38,7
Сушильна камера	4510	11,3
Вентиляційна система та автоматика	10650	26,6
Монтаж та налагодження	2000	5,0
Транспортні витрати	800	2,0
Непередбачені витрати (5%)	547	1,4
Всього CAPEX	40007	100

Приймаємо капітальні витрати $K = 40\,000$ грн.

5.5 Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Амортизаційні відрахування:

$$C_{\text{ам}} = \frac{40000 \cdot 10}{100} = 4000 \text{ грн/рік}$$

Витрати на електроенергію.

Вентилятор потужністю 50 Вт працює в середньому 8 годин на добу протягом 90 днів сезону сушіння:

$$t_{\text{роб}} = 8 \cdot 90 = 720 \text{ год/рік}$$

$$C_{\text{ел}} = 0,05 \cdot 720 \cdot 4,32 = 155,5 \text{ грн/рік}$$

З урахуванням живлення від фотоелектричної панелі, фактичні витрати на електроенергію з мережі становлять близько 30%:

$$C_{\text{ел.факт}} = 155,5 \cdot 0,3 \approx 47 \text{ грн/рік}$$

Витрати на ремонт та технічне обслуговування

Приймаються на рівні 3% від капітальних витрат:

$$C_{\text{рем}} = 40000 \cdot 0,03 = 1200 \text{ грн/рік}$$

Витрати на оплату праці

					14.17 - КР. 022.5.000 ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обслуговування сушарки не потребує постійної присутності оператора.

Витрати на оплату праці становлять:

$$C_{\text{зп}} = 0,5 \cdot 120 \cdot 90 = 5400 \text{ грн/рік}$$

де 0,5 год/добу – середній час обслуговування; 120 грн/год – вартість люд-години; 90 днів – тривалість сезону.

З нарахуваннями ЄСВ (22%):

$$C_{\text{зп.повн}} = 5400 \cdot 1,22 = 6588 \text{ грн/рік}$$

Інші витрати

$$C_{\text{інш}} = 500 \text{ грн/рік}$$

Зведені річні експлуатаційні витрати (таблиця 5.8).

Таблиця 5.8 – Зведені річні експлуатаційні витрати

Стаття витрат	Сума, грн/рік
1	2
Амортизація	4000
Електроенергія	47
Ремонт та обслуговування	1200
Оплата праці з нарахуваннями	6588
Інші витрати	500
Всього ОРЕХ	12335

Розрахунок річного економічного ефекту

Економія на енергоносіях.

Електрична сушарка для отримання 1 кг сухої продукції споживає в середньому 2,5 кВт·год. Для річної продуктивності 3000 кг сухої продукції:

$$Q_{\text{ел.суш}} = 3000 \cdot 2,5 = 7500 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

Витрати на електроенергію в електричній сушарці:

$$B_{\text{ел.суш}} = 7500 \cdot 4,32 = 32400 \text{ грн/рік}$$

Витрати на електроенергію в сонячній сушарці (тільки вентилятор):

					14.17 - КР. 022.5.000 ПЗ	Аркуш
						85
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$B_{\text{сонц.суш}} = 47 \text{ грн/рік}$$

Економія на енергоносіях:

$$E_{\text{ен}} = 32400 - 47 = 32353 \text{ грн/рік}$$

Ефект від зменшення післязбиральних втрат.

Сонячна сушарка дозволяє своєчасно переробляти врожай, зменшуючи втрати свіжої продукції з 30% (базовий варіант – відкрите сушіння або відсутність сушіння) до 10% (проектний варіант). При річній масі свіжої продукції:

$$M_{\text{свіж}} = \frac{M_{\text{dry}}}{k_{\text{вих}}} = \frac{3000}{0,15} = 20000 \text{ кг}$$

Де $k_{\text{вих}} = 0,15$ – коефіцієнт виходу сухої продукції з свіжої.

Ефект від зменшення втрат:

$$E_{\text{втр}} = 20000 \cdot (0,30 - 0,10) \cdot 350 \cdot 0,15 = 20000 \cdot 0,20 \cdot 52,5 = 210000 \text{ грн/рік}$$

Однак, з урахуванням реальних умов господарювання, приймаємо консервативну оцінку – 50% від розрахункової:

$$E_{\text{втр}} = 105000 \text{ грн/рік}$$

Ефект від підвищення якості продукції.

Сушена продукція, отримана в сонячній сушарці, має кращий товарний вигляд, збережений колір та аромат, що дозволяє реалізувати її за вищою ціною (премія 10%):

$$E_{\text{як}} = 3000 \cdot 350 \cdot 0,10 = 105000 \text{ грн/рік}$$

Економія на оплаті праці.

Автоматизація процесу сушіння дозволяє зменшити витрати на оплату праці порівняно з традиційним відкритим сушінням, яке потребує постійного нагляду. Економія становить:

$$E_{\text{зп}} = 3000 \text{ грн/рік}$$

					14.17 - КР. 022.5.000 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зведений річний економічний ефект (таблиця 5.9)

Таблиця 5.9 – Зведений річний економічний ефект

Джерело ефекту	Сума, грн/рік
1	2
Економія на енергоносіях	32353
Зменшення післязбиральних втрат	105000
Підвищення якості продукції	105000
Економія на оплаті праці	3000
Всього ефект	245353

Чистий річний грошовий потік

$$CF_{\text{річ}} = E_{\text{річ}} - C_{\text{річ}} = 245353 - 12335 = 233018 \text{ грн/рік}$$

Розрахунок показників ефективності інвестицій

Чистий приведений дохід (NPV).

При ставці дисконтування $r = 15\%$ та горизонті планування $T = 10$ років:

$$NPV = \sum_{t=1}^{10} \frac{233018}{(1 + 0,15)^t} - 40000$$

Розрахунок суми дисконтованих грошових потоків:

$$\sum_{t=1}^{10} \frac{1}{(1,15)^t} = 5,0188$$

$$NPV = 233018 \cdot 5,0188 - 40000 = 1169462 - 40000 = 1129462 \text{ грн}$$

$NPV = 1\,129\,462 \text{ грн} > 0$ – проєкт є економічно доцільним.

Індекс рентабельності інвестицій (PI).

$$PI = \frac{1169462}{40000} = 29,24$$

$PI = 29,24 > 1$ – проєкт є високорентабельним.

Внутрішня норма дохідності (IRR).

Розв'язуємо рівняння:

$$\sum_{t=1}^{10} \frac{233018}{(1+IRR)^t} - 40000 = 0$$

При IRR = 100%: сума = $233018 \cdot 0,999 = 232833$; NPV = $192833 > 0$.

При IRR = 500%: сума = $233018 \cdot 0,2 = 46604$; NPV = $6604 > 0$.

При IRR = 580%: сума = $233018 \cdot 0,172 = 40079$; NPV = $79 \approx 0$.

IRR $\approx$ 580% – значно перевищує ставку дисконтування.

Період окупності (PP).

$$PP = \frac{40000}{233018} = 0,17 \text{ року} \approx 2 \text{ місяці}$$

Дисконтований період окупності (DPP).

$$DPP = \frac{40000}{233018/1,15} = \frac{40000}{202624} = 0,197 \text{ року} \approx 2,4 \text{ місяці.}$$

Рентабельність інвестицій (ROI)

$$ROI = \frac{233018}{40000} \cdot 100\% = 582,5\%$$

Зведена таблиця показників ефективності (таблиця 5.10)

Таблиця 5.10 – Зведені показники ефективності інвестиційного проекту

Показник	Позначення	Значення	Критерій
1	2	3	4
Капітальні витрати	K	40 000 грн	–
Річні експлуатаційні витрати	C_річ	12 335 грн	–
Річний економічний ефект	E_річ	245 353 грн	–
Чистий річний грошовий потік	CF_річ	233 018 грн	–
Чистий приведений дохід	NPV	1 129 462 грн	> 0
Індекс рентабельності	PI	29,24	> 1
Внутрішня норма дохідності	IRR	$\sim 580\%$	$> r$
Період окупності	PP	0,17 року	$< T$
Дисконтований період окупності	DPP	0,197 року	$< T$
Рентабельність інвестицій	ROI	582,5%	$> 100\%$

Аналіз чутливості проєкту

Аналіз чутливості дозволяє оцінити стійкість проєкту до зміни ключових параметрів. Розглянуто три сценарії: песимістичний, реалістичний та оптимістичний (таблиця 5.11).

Таблиця 5.11 – Аналіз чутливості за сценаріями

Параметр	Песимістичний	Реалістичний	Оптимістичний
1	2	3	4
Ціна сушеної продукції, грн/кг	250	350	450
Річна продуктивність, кг	2000	3000	4000
Ставка дисконтування, %	20	15	10
Економія на енергоносіях, грн	21569	32353	43138
Ефект від зменшення втрат, грн	70000	105000	140000
Ефект від якості, грн	50000	105000	180000
Економія на оплаті праці, грн	2000	3000	4000
Річний ефект, грн	143569	245353	367138
OPEX, грн	12335	12335	12335
CF_річ, грн	131234	233018	354803
NPV, грн	401234	1 129 462	2 126 890
PI	11,03	29,24	54,17
IRR, %	~330	~580	~890
PP, років	0,30	0,17	0,11

Навіть за песимістичного сценарію проєкт залишається високоефективним: $NPV > 0$, $PI > 1$, термін окупності – менше 4 місяців.

Порівняння з альтернативними варіантами сушіння (таблиця 5.12).

Таблиця 5.12 – Порівняльний аналіз варіантів сушіння

Показник	Відкрите сонячне сушіння	Електрична сушарка	Газова сушарка	Сонячна сушарка з ТА (проект)
1	2	3	4	5
Капітальні витрати, грн	0	25 000	45 000	40 000
Річні експлуатаційні витрати, грн	0	32 400	28 000	12 335
Тривалість сушіння, год	48–72	8–12	8–12	16–24
Якість продукції	низька	висока	висока	висока
Втрати продукції, %	30	5	5	10
Екологічність	висока	низька	низька	висока
Залежність від погоди	повна	відсутня	відсутня	часткова
Автономність	–	ні	ні	так
Термін окупності	–	1,5 року	2 роки	0,17 року

Сонячна сушарка з тепловим акумулятором має найкращі показники серед розглянутих альтернатив: найнижчі експлуатаційні витрати, найкоротший термін окупності, високу якість продукції та екологічність.

Соціальний та екологічний ефекти.

Соціальний ефект

- Створення робочих місць: обслуговування сушарки потребує 0,5 ставки оператора, що сприяє зайнятості сільського населення.
- Підвищення кваліфікації: робота з сучасним обладнанням потребує навчання персоналу.
- Покращення умов праці: автоматизація процесу зменшує фізичне навантаження.

					14.17 - КР. 022.5.000 ПЗ	Аркуш
						90
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Збільшення доходів: додатковий прибуток від реалізації якісної продукції.

Екологічний ефект:

– Скорочення викидів CO₂: заміщення електричної сушарки дозволяє зменшити викиди на 4,5 т CO₂/рік.

– Зменшення харчових відходів: своєчасне сушіння зберігає до 20% врожаю.

– Використання відновлюваної енергії: сонячна енергія є невичерпною та екологічно чистою.

– Зниження залежності від викопного палива.

Розроблений проєкт є технічно обґрунтованим, економічно високоефективним, екологічно безпечним та соціально значущим.

					14.17 - КР. 022.5.000 ПЗ	Аркуш
						91
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Виконано техніко-економічне обґрунтування інноваційного проєкту сонячної сушарки з комбінованим тепловим акумулятором для плодоовочевої продукції. Визначено, що капітальні витрати на виготовлення та монтаж установки становлять 40 000 грн, річні експлуатаційні витрати – 12 335 грн.

2. Річний економічний ефект від впровадження становить 245 353 грн, що формується за рахунок економії на енергоносіях (32 353 грн), зменшення післязбиральних втрат (105 000 грн), підвищення якості продукції (105 000 грн) та економії на оплаті праці (3 000 грн). Чистий річний грошовий потік – 233 018 грн.

3. Показники ефективності інвестицій підтверджують високу доцільність проєкту: $NPV = 1\,129\,462$ грн, $PI = 29,24$, $IRR \approx 580\%$, $PP = 0,17$ року (≈ 2 місяці), $DPP = 0,197$ року, $ROI = 582,5\%$.

4. Аналіз чутливості показав, що навіть за песимістичного сценарію (зниження ціни продукції на 30%, продуктивності на 33%, підвищення ставки дисконтування до 20%) проєкт залишається високоефективним: $NPV = 401\,234$ грн, $PI = 11,03$, термін окупності – 0,30 року.

5. Порівняльний аналіз з альтернативними варіантами сушіння (відкрите сонячне, електричне, газове) показав, що розроблена сонячна сушарка має найкращі показники: найнижчі експлуатаційні витрати, найкоротший термін окупності, високу якість продукції та екологічність.

6. Соціальний ефект проявляється у створенні робочих місць, підвищенні кваліфікації персоналу та покращенні умов праці. Екологічний ефект – у скороченні викидів CO_2 на 4,5 т/рік, зменшенні харчових відходів та використанні відновлюваної енергії.

					14.17 - КР. 022.5.000 ПЗ	Аркуш
						92
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання – підвищення енергоефективності та якості сушіння плодоовочевої продукції шляхом розробки сонячної сушарки з комбінованим тепловим акумулятором (SHS + PCM) для умов фермерських та особистих селянських господарств України. На основі виконаних теоретичних, експериментальних та інженерних досліджень сформульовано такі висновки:

1. Аналіз сучасного стану проблеми. Встановлено, що післязбиральні втрати плодоовочевої продукції у світі сягають 30–50% (за даними FAO – близько 1,3 млрд тонн щорічно), що має не лише економічне, а й соціальне та екологічне значення. Традиційне відкрите сонячне сушіння має суттєві недоліки: залежність від погоди, тривалість процесу, ризик забруднення, нерівномірність видалення вологи та втрата поживних речовин. Промислові сушарки (електричні, газові) забезпечують високу якість, але характеризуються значними капітальними та експлуатаційними витратами й негативним впливом на довкілля. Доведено, що найбільш перспективним компромісним рішенням є сонячні сушарки непрямого нагріву з тепловими акумуляторами, які поєднують екологічність, енергоефективність та доступність.

2. Класифікація та обґрунтування вибору конструкції. Систематизовано фундаментальну класифікацію сонячних сушарок за способом використання сонячної енергії (прямий, непрямий, змішаний нагрів), типом циркуляції повітря (пасивна, активна), конструкцією сушильної камери (камерні, тунельні, стрічкові, лоткові) та наявністю теплового акумулятора.

					14.17 - КР.022.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ	Літ.	Аркуш	Архувів
Розроб.		Тарасов Д.						
Перевір.		Дядюра К. О.					3	93
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Обґрунтовано вибір сонячної сушарки непрямого нагріву з плоским сонячним колектором та комбінованим SHS-PCM тепловим акумулятором, що забезпечує сушіння при температурі 45–60 °С, захищає продукт від прямого ультрафіолетового випромінювання та дозволяє підтримувати безперервність процесу в нічний час і в хмарну погоду.

3. Теоретичне обґрунтування теплообмінних процесів. Розроблено комплексну математичну модель теплообміну в сонячній сушарці з тепловим акумулятором, яка включає:

- модель теплового балансу плоского сонячного колектора на основі рівняння Хоттеля-Віллє-Блісса (HWB), що дозволяє визначити термічний ККД колектора (43–52%) та температуру повітря на виході (40–70 °С);
- систему диференціальних рівнянь нестационарного теплообміну в насадному акумуляторі з твердим теплоакумуючим матеріалом (галька), що описує зміну температури газової та твердої фаз уздовж висоти акумулятора;
- математичну модель акумуляції теплової енергії з використанням фазоперехідних матеріалів (парафін) на основі методу ентальпії, що враховує чутливе тепло, приховане тепло плавлення та перегрівання рідкої фази;
- математичні моделі кінетики сушіння плодоовочевої продукції (модель Пейджа, модифікована модель Хендерсона і Пабіса, рівняння Арреніуса для ефективного коефіцієнта дифузії).

Встановлено, що використання парафіну як PCM дозволяє сушарці працювати до 3,5 годин без сонячного світла, а розташування PCM під абсорберною пластиною забезпечує вищу середню температуру в сушильній камері.

4. Аеродинамічний розрахунок та CFD-моделювання. Виконано аеродинамічний розрахунок системи з використанням формули Ергана для визначення втрат тиску в шарі акумулятора. Встановлено залежність втрат тиску від порожнистості шару, розміру частинок та швидкості повітря. Обґрунтовано доцільність застосування методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) для оптимізації конструкції сонячної сушарки. Точність CFD-моделей

					14.17 - КР. 022.0.000 ПЗ	Аркуш
						94
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтверджується експериментальними даними, а керівні рівняння розв'язуються методом кінцевих об'ємів з використанням комерційного коду ANSYS-Fluent.

5. Практична цінність та впровадження. Розроблена сонячна сушарка з комбінованим тепловим акумулятором є технічно обґрунтованим, науково новим, екологічно безпечним та економічно високоефективним рішенням, готовим до практичного впровадження у фермерських та особистих селянських господарствах України. Рекомендовано поетапне впровадження: від пілотного зразка до серійного виробництва. Соціальний ефект проявляється у створенні робочих місць, підвищенні кваліфікації персоналу та покращенні умов праці. Екологічний ефект – у скороченні викидів CO₂, зменшенні харчових відходів та використанні відновлюваної енергії.

6. Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на:

- вдосконалення РСМ шляхом наномодифікації (додавання графену, міді, оксиду алюмінію) для підвищення теплопровідності;
- оптимізацію конструкції колектора (подвійне скління, селективні покриття абсорбера);
- впровадження інтелектуальних систем керування (IoT, AI) для автоматичної оптимізації процесу сушіння;
- розробку модульних конструкцій для масштабування під різні обсяги виробництва;
- проведення тривалих натурних випробувань у різних кліматичних зонах України;
- дослідження можливості використання гібридних систем з тепловими насосами для забезпечення стабільної роботи в будь-яких погодних умовах.

Таким чином, поставлену мету кваліфікаційної роботи досягнуто, всі завдання виконано в повному обсязі.

					14.17 - КР. 022.0.000 ПЗ	Аркуш
						95
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kumar A., Singh R., Prakash O. Review on solar dryers with thermal energy storage for agricultural products // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 142. – P. 110855. – DOI: 10.1016/j.rser.2021.110855.
2. El Khadraoui A., Bouadila S., Kooli S., Farhat A., Guizani A. Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 148. – P. 37–48. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.149.
3. Shalaby S. M., Bek M. A., El-Sebaei A. A. Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 33. – P. 110–116. – DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.073.
4. Bal L. M., Satya S., Naik S. N. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14, No. 8. – P. 2298–2314. – DOI: 10.1016/j.rser.2010.04.014.
5. Kant K., Shukla A., Sharma A., Kumar A., Jain A. Thermal energy storage based solar drying systems: A review // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2016. – Vol. 34. – P. 86–99. – DOI: 10.1016/j.ifset.2016.01.007.
6. Mohana Reddy R., Rao P. V., Sushma G., Sreenivasulu K. Experimental investigation of solar drying of fruits with thermal energy storage // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 109. – P. 416–423. – DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.045.
7. Ayyappan S., Mayilsamy K., Sreenarayanan V. V. Performance improvement studies in a solar greenhouse dryer using sensible heat storage materials // Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 52, No. 3. – P. 459–467. – DOI: 10.1007/s00231-015-1550-2.

					14.17 - КР.022.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Тарасов Д					96	3
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						

8. Atalay H., Cankurtaran E. Energy, exergy, exergoeconomic and exergo-environmental analyses of a solar dryer with phase change material // Solar Energy. – 2021. – Vol. 224. – P. 1351–1364. – DOI: 10.1016/j.solener.2021.07.001.

9. Cakmak G., Yıldız C. Design of a new solar dryer with phase change material for drying of agricultural products // Solar Energy. – 2011. – Vol. 85, No. 9. – P. 2150–2160. – DOI: 10.1016/j.solener.2011.05.022.

10. Jain D., Tewari P. Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage // Renewable Energy. – 2015. – Vol. 80. – P. 244–250. – DOI: 10.1016/j.renene.2015.02.012.

11. Esakkimuthu S., Hassabou A. H., Palaniappan C., Spinnler M., Blumenberg J., Velraj R. Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications // Solar Energy. – 2013. – Vol. 88. – P. 144–153. – DOI: 10.1016/j.solener.2012.11.006.

12. Karthikeyan A. K., Murugavelh S. Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer // Renewable Energy. – 2018. – Vol. 128. – P. 305–312. – DOI: 10.1016/j.renene.2018.05.061.

13. Vijayan S., Arjunan T. V., Kumar A. Exergo-environmental analysis of an indirect forced convection solar dryer integrating solar photovoltaic module and thermal storage // Solar Energy. – 2020. – Vol. 195. – P. 704–720. – DOI: 10.1016/j.solener.2019.11.090.

14. Dissa A. O., Desmorieux H., Bathiebo J., Koulidiati J. Convective drying characteristics of Amelie and Brooks mangoes // Journal of Food Engineering. – 2008. – Vol. 88, No. 4. – P. 560–569. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.01.013.

15. Doymaz İ. Drying kinetics of grape leaves // Journal of Food Engineering. – 2011. – Vol. 105, No. 2. – P. 315–321. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.02.022.

16. Onwude D. I., Hashim N., Janius R. B., Nawi N. M., Abdan K. Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2016. – Vol. 15, No. 3. – P. 599–618. – DOI: 10.1111/1541-4337.12196.

					14.17 - KP. 022.0.000 ПЗ	Аркуш
						97
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Ergun S. Fluid flow through packed columns // Chemical Engineering Progress. – 1952. – Vol. 48, No. 2. – P. 89–94.

18. Hottel H. C., Whillier A. Evaluation of flat-plate solar collector performance // Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy. – 1958. – Vol. 2. – P. 74–104.

19. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. – 4th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. – 936 p.

20. Sharma A., Tyagi V. V., Chen C. R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol. 13, No. 2. – P. 318–345. – DOI: 10.1016/j.rser.2007.10.005.

21. Cengel Y. A., Ghajar A. J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. – 6th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2020. – 1056 p.

22. ANSYS Inc. ANSYS Fluent Theory Guide. – Release 2023 R1. – Canonsburg: ANSYS Inc., 2023. – 1058 p.

					14.17 - KP. 022.0.000 ПЗ	Аркуш
						98
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		