

УДК 631.364:621.311.243
№ держреєстрації 0121U110251
Інв. №:

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

Юридична адреса:

72310, м. Мелітополь, пр. Богдана Хмельницького, 18; тел. (0619) 42 06 18

Фактична адреса:

69600, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 66; тел. +38 099 6148302

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Таврійського державного
агротехнологічного університету
імені Дмитра Моторного,
докт. техн. наук, професор
Сергій КЮРЧЕВ

«25» грудня 2025 р.



ЗВІТ
про науково-дослідну роботу
(остаточний)

**Програма: Технічне забезпечення інноваційних технологій
в агропромисловому комплексі**
**Підпрограма: Розробка технологій та технологічного обладнання для
енерго-ресурсозбереження в технологічних процесах АПК**

Завідувач лабораторії,
канд. техн. наук

Олександр СКЛЯР
«23» грудня 2025 р.

2025

Результати роботи розглянуто НТР НДІ МЗПУ,
протокол №4 від «24» грудня 2025 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник теми і
відповідальний виконавець -
кандидат технічних наук

Олександр СКЛЯР
(вступ, розділи 1, 2, 3, 4,
висновки)

Відповідальний виконавець
кандидат технічних наук

Борис БОЛТЯНСЬКИЙ
(розділи 1, 2, 3, 4)

кандидат технічних наук

Радміла СКЛЯР
(участь у розділах 2, 3, 4)

провідний інженер

Сергій ДЕРЕЗА
(участь у розділі 3, 4)

інженер

Сергій ГРИГОРЕНКО
(участь у розділі 4)

інженер

Артем КОМАР
(участь у розділі 4)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 26 с., 10 рис., 6 табл., 21 джерело.

Об'єкт досліджень: процес дослідження енергетичних характеристик геліосушарки з урахуванням метрологічних властивостей засобів вимірювання теплотехнічних параметрів.

Мета роботи: розроблення та обґрунтування методики дослідження енергетичних характеристик геліосушарки із врахуванням метрологічних властивостей засобів вимірювання теплотехнічних параметрів. Реалізація цієї мети дозволить підвищити точність оцінювання ефективності сушильних установок, оптимізувати їх роботу та сприятиме розвитку технологій енергозбереження у сільськогосподарському виробництві.

Методи досліджень.

Теоретичні дослідження проводили із застосуванням теорії вищої математики. Експериментальні дослідження здійснювали згідно з методикою проведення повного факторного експерименту. Оброблення дослідних даних здійснювали на ПЕОМ із застосуванням математичної статистики та регресійного аналізу.

В результаті досліджень встановлено наступне:

1. Визначені метрологічні характеристики засобів вимірювання теплотехнічних параметрів (термопар, анемометрів, психрометрів), оцінено їх похибки та стабільність у змінних умовах роботи геліосушарки.
2. Розроблено експериментальну установку та методику проведення вимірювань, яка забезпечує високу точність визначення температури, вологості, швидкості повітряного потоку та інтенсивності сонячного випромінювання.
3. Оцінено вплив похибок вимірювальних приладів на результати визначення енергетичних характеристик і розроблено рекомендації щодо підвищення точності вимірювань.
4. Запропоновано шляхи вдосконалення конструкції та режимів роботи геліосушарки, спрямовані на підвищення її енергоефективності та зменшення енергетичних втрат.

СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ, ГЕЛІОСУШАРКА, ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЛОГІСНІ ПОЛЯ, ТЕПЛОМАСОПЕРЕНЕСЕННЯ, ІНТЕНСИФІКАЦІЯ, КОНВЕКТИВНЕ СУШІННЯ

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП. | 5 |
| 1 ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ. | 6 |
| 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ. | 6 |
| 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. | 16 |
| ВИСНОВКИ. | 22 |
| 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗА 2021-2024 рр. | 23 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ. | 25 |

ВСТУП

У сучасних умовах зростаючого дефіциту енергоресурсів і необхідності переходу до відновлюваних джерел енергії особливої актуальності набуває підвищення енергоефективності технологічних процесів сушіння сільськогосподарської продукції.

Геліосушарки, що використовують енергію сонячного випромінювання, є екологічно чистими та економічно вигідними установками, однак їхня ефективність значною мірою залежить від коректності вимірювання теплотехнічних параметрів і стабільності роботи вимірювальних засобів. Недостатня точність терморезисторів, похибки вимірювання температури та вологості, а також відсутність єдиної методики визначення енергетичних характеристик геліосушарок ускладнюють проведення достовірних експериментальних досліджень і оптимізацію режимів сушіння.

Тому виникає потреба в розробленні науково обґрунтованої методики дослідження енергетичних параметрів геліосушарки з урахуванням метрологічних властивостей засобів вимірювання, що забезпечить підвищення точності оцінювання ефективності її роботи та вдосконалення конструкцій сонячних сушильних систем [1-3].

Незважаючи на наявність значної кількості робіт, що присвячені моделюванню теплових процесів у геліосушарках, питання комплексного підходу до експериментального дослідження їх енергетичних характеристик разом із оцінкою метрологічних властивостей вимірювальних засобів залишаються недостатньо розробленими. Більшість досліджень зосереджуються на оптимізації режимів сушіння чи вдосконаленні конструкції колекторів, тоді як забезпечення точності вимірювань та оцінка похибок у реальних умовах експлуатації залишаються поза увагою [4-8].

Таким чином, виникає науково-практична проблема, що полягає у відсутності системного підходу до визначення енергетичних параметрів геліосушарки з урахуванням метрологічної оцінки точності вимірювань теплотехнічних величин. Необхідно розробити методику, яка дозволить комплексно аналізувати процес сушіння, забезпечуючи достовірність отриманих даних і можливість порівняння результатів для різних типів геліосушарок.

1 ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Процес дослідження енергетичних характеристик геліосушарки з урахуванням метрологічних властивостей засобів вимірювання теплотехнічних параметрів.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Теоретичні передумови

Розроблення методики дослідження енергетичних характеристик геліосушарки передбачає комплексне визначення параметрів сушильного процесу та метрологічну оцінку засобів вимірювання теплотехнічних величин. У геліосушарках стандартні режими сушіння фруктів регламентуються параметрами сушильного агента – температурою, відносною вологістю та психрометричною різницею, які змінюються залежно від вологості сировини. Для збереження фізико-хімічних властивостей фруктів переважно застосовуються низькотемпературні режими, тоді як м'які, нормальні, форсовані та високотемпературні режими впливають на тривалість сушіння та збереження вітамінів. Відносна вологість повітря визначається як відношення парціального тиску водяної пари до тиску насичення при даній температурі, а психрометрична різниця – як різниця між температурою сушильного агента та температурою змоченого термометра [9,10].

У межах методики дослідження параметри сушильного агента контролюються за допомогою сенсорів і термопар із багатоканальними регуляторами, що дозволяє оцінити теплові характеристики, ефективність теплоаккумуляції та вплив на фізико-хімічні властивості сировини. Низькотемпературні режими сушіння, наведені у табл. 2.1, з 44 варіантами за температурою та відносною вологістю, використовуються, як базові для експериментальної перевірки розробленої методики, що забезпечує точне визначення енергетичних та теплотехнічних показників геліосушарки.

2.2 Методика експериментальних досліджень

Розроблено конструкцію міні-геліосушарки з тепловим акумулятором і плоским дзеркальним концентратором, призначена для сушіння фруктів, яка показана на рис. 2.1, 2.2 [11-13].

Конструкція установки складається з корпусу геліосушарки (1, 2) – основна конструктивна частина, що забезпечує підтримку всіх компонентів та формування сушильної камери. Виконується з теплоізоляційного матеріалу на основі деревини з метою мінімізації теплових втрат. Прозоре покриття (3) – скляна панель, яка пропускає сонячне випромінювання до абсорбера і

одночасно мінімізує теплові втрати з камери. Абсорбер (4) – сонячний колектор, що поглинає сонячне випромінювання та передає тепло повітрю, яке рухається всередині камери.



Рис. 2.1. Загальний вигляд лабораторної установки для дослідження параметрів геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором

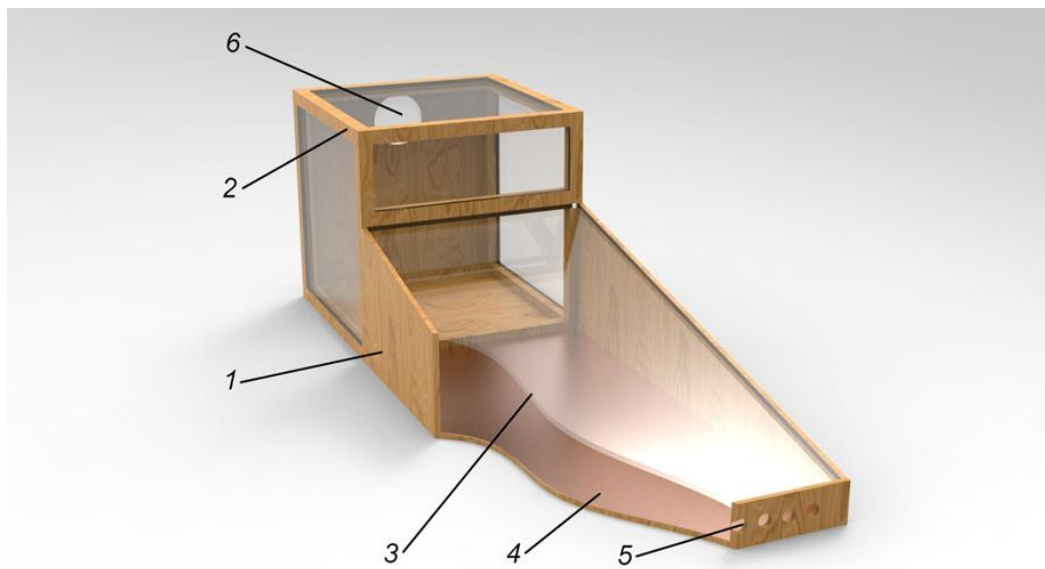


Рис. 2.2. Тривимірна геометрична розрахункова модель міні-геліосушарки

Таблиця 2.1. Режими низькотемпературного процесу сушіння фруктів геліосушарці

| Індекс режиму | Волога сировини, % | Номер режиму і параметри (t, E, φ) сушильного агента | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------------|--|-----|------|-----|----|------|-----|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|------|---|---|---|
| | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | | 5 | | | 6 | | | 7 | | | 8 | | | 9 | | | 10 | | | | | |
| | | t | E | φ | t | E | φ | t | E | φ | t | E | φ | t | E | φ | t | E | φ | t | E | φ | t | E | φ | t | E | φ | t | E | φ | | | |
| | >80 | 90 | 4 | 0,85 | 82 | 3 | 0,88 | 75 | 3 | 0,87 | 69 | 3 | 0,87 | 63 | 2 | 0,91 | 57 | 2 | 0,90 | 52 | 2 | 0,90 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| А | 80—60 | 95 | 7 | 0,76 | 87 | 6 | 0,78 | 80 | 6 | 0,77 | 73 | 6 | 0,76 | 67 | 5 | 0,78 | 61 | 5 | 0,78 | 55 | 4 | 0,80 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 60 - 20 | 120 | 32 | 0,32 | 108 | 27 | 0,35 | 100 | 26 | 0,35 | 91 | 24 | 0,36 | 83 | 22 | 0,36 | 77 | 21 | 0,36 | 70 | 20 | 0,35 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 20 - 3 | 90 | 5 | 0,81 | 82 | 4 | 0,84 | 75 | 4 | 0,84 | 69 | 4 | 0,83 | 63 | 3 | 0,86 | 57 | 3 | 0,85 | 52 | 3 | 0,84 | 47 | 2 | 0,90 | 42 | 2 | 0,89 | 38 | 2 | 0,88 | | | |
| Б | >80 | 95 | 9 | 0,70 | 87 | 8 | 0,72 | 80 | 8 | 0,70 | 73 | 7 | 0,72 | 67 | 6 | 0,75 | 60 | 6 | 0,74 | 55 | 5 | 0,76 | 50 | 5 | 0,75 | 45 | 4 | 0,79 | 41 | 4 | 0,77 | | | |
| | 80—30 | 120 | 34 | 0,29 | 108 | 29 | 0,32 | 100 | 29 | 0,32 | 91 | 25 | 0,34 | 83 | 23 | 0,34 | 77 | 22 | 0,34 | 70 | 21 | 0,35 | 62 | 18 | 0,36 | 57 | 17 | 0,36 | 52 | 16 | 0,36 | | | |
| | 30 - 3 | 90 | 7 | 0,75 | 82 | 6 | 0,77 | 75 | 5 | 0,80 | 69 | 5 | 0,79 | 63 | 4 | 0,82 | 57 | 4 | 0,81 | 52 | 4 | 0,80 | 47 | 3 | 0,84 | 42 | 3 | 0,83 | 38 | 3 | 0,82 | | | |
| В | >80 | 95 | 11 | 0,65 | 87 | 10 | 0,66 | 80 | 9 | 0,66 | 73 | 8 | 0,69 | 67 | 7 | 0,71 | 60 | 7 | 0,70 | 55 | 7 | 0,68 | 50 | 6 | 0,70 | 45 | 5 | 0,74 | 41 | 5 | 0,77 | | | |
| | 80—30 | 120 | 36 | 0,26 | 108 | 31 | 0,30 | 100 | 29 | 0,30 | 91 | 26 | 0,33 | 83 | 24 | 0,32 | 77 | 23 | 0,32 | 70 | 22 | 0,31 | 62 | 19 | 0,33 | 57 | 18 | 0,34 | 52 | 17 | 0,30 | | | |
| | 30 - 3 | 90 | 9 | 0,69 | 82 | 8 | 0,71 | 75 | 7 | 0,73 | 69 | 6 | 0,76 | 63 | 5 | 0,78 | 57 | 5 | 0,76 | 52 | 5 | 0,75 | 47 | 4 | 0,79 | 42 | 4 | 0,77 | 38 | 4 | 0,76 | | | |
| Г | >80 | 95 | 13 | 0,60 | 87 | 12 | 0,60 | 80 | 11 | 0,61 | 73 | 10 | 0,63 | 67 | 9 | 0,64 | 60 | 9 | 0,62 | 55 | 8 | 0,64 | 50 | 7 | 0,66 | 45 | 6 | 0,69 | 41 | 6 | 0,67 | | | |
| | 80—50 | 120 | 37 | 0,25 | 108 | 33 | 0,27 | 100 | 31 | 0,27 | 91 | 28 | 0,30 | 83 | 25 | 0,30 | 77 | 25 | 0,29 | 70 | 23 | 0,29 | 62 | 20 | 0,31 | 57 | 19 | 0,31 | 52 | 18 | 0,30 | | | |
| | 30 - 3 | 90 | 1.1 | 0,63 | 82 | 10 | 0,65 | 75 | 9 | 0,66 | 69 | 8 | 0,68 | 63 | 7 | 0,70 | 57 | 6 | 0,72 | 52 | 6 | 0,71 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | |
| Д | >80 | 95 | 15 | 0,54 | 87 | 14 | 0,55 | 80 | 13 | 0,55 | 73 | 12 | 0,56 | 67 | 11 | 0,58 | 60 | 10 | 0,59 | 55 | 9 | 0,60 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | |
| | 80—5 | 120 | 38 | 0,24 | 108 | 35 | 0,24 | 100 | 33 | 0,25 | 91 | 30 | 0,26 | 83 | 27 | 0,28 | 77 | 26 | 0,27 | 70 | 24 | 0,27 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | |

Його конструкція дозволяє ефективно нагрівати теплоносії, що виконаний з листової міді товщиною 1 мм. Робоча поверхня горизонтальна і похила поверхня всередині сушильної камери, на якій розташовується продукт для сушіння. Часто має покриття, що забезпечує рівномірний розподіл тепла. Сушильна камера всередині якої циркулює гаряче повітря і відбувається видалення вологи з продукту. Забезпечує рівномірне сушіння та контроль температурного режиму. Має вхідні отвори (5) – призначені для подачі атмосферного повітря в сушильну камеру, що забезпечує ефективну вентиляцію і підтримання потоку теплоносія та вихідні отвори (6) – отвори для виведення вологого повітря з камери. Ця конструкція дозволяє ефективно перетворювати сонячну енергію на тепло для сушіння продуктів, забезпечуючи контроль температури та вологості в камері.

Для вимірювання сонячної освітленості застосовувався піранометр ПЕЛЕНГ СФ-06, розташований під регульованим кутом до горизонту. Рух теплоносія забезпечується вентилятором, а надлишкове тепло накопичується у тепловому акумуляторі, заповненому гравієм, який водночас виступає елементом стабілізації температурного режиму. Контроль температури, вологості та швидкості потоку здійснювали за допомогою термопар, анемометрів та термогігрометрів, підключених до системи комп'ютерної реєстрації даних. Геліосушарка працює за принципом конвективного нагрівання повітря, яке, проходячи через теплоакумулюючий шар, надходить у сушильну камеру й забезпечує рівномірне висушування фруктів. У похмурі періоди установка функціонує завдяки теплу, накопиченому в акумуляторі, що дозволяє підтримувати процес сушіння. Для підсилення потоку сонячної енергії використовується плоский дзеркальний концентратор, який сприяє підвищенню енергоефективності геліосушарки.

Сучасні технологічні процеси сушіння потребують постійного моніторингу численних змінних параметрів для ефективного керування якістю кінцевого продукту. Для цього застосовуються давачі (сенсори), що перетворюють фізичні сигнали у електричні, передаючи їх на вимірювальні перетворювачі для подальшої обробки та відображення. Найпоширенішими засобами контролю є термопари, які входять до складу регуляторів температури, що забезпечують індикацію, запис і передачу даних на комп'ютер. Одним із таких пристроїв є багатоканальний регулятор-вимірювач РТ-0102, який працює з термопарами типу хромель-алюмель і здійснює вимірювання, сигналізацію та регулювання температури на восьми незалежних каналах. Структурна схема РТ-0102 представлена на рис. 2.3, а загальний вигляд і монтажні параметри – на рис. 2.4.

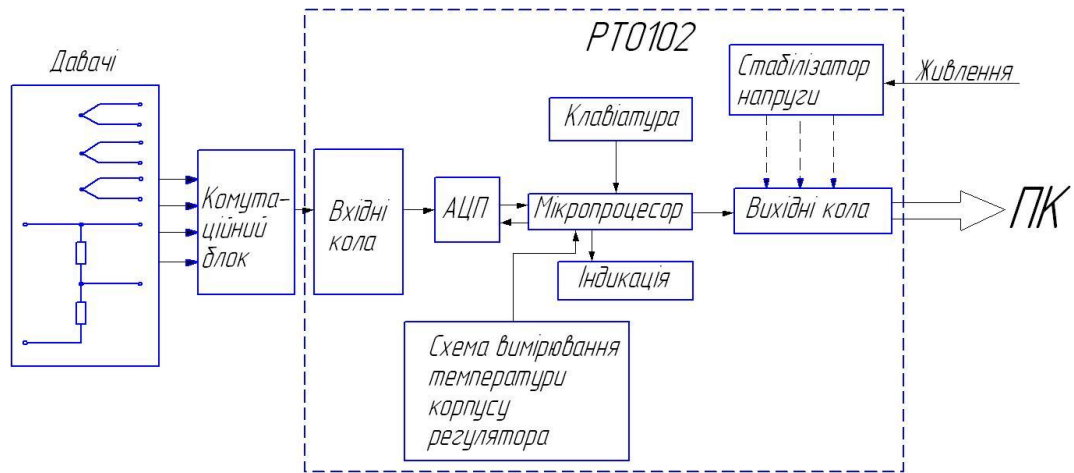


Рис. 2.3. Структурна схема вимірювача РТ-0102

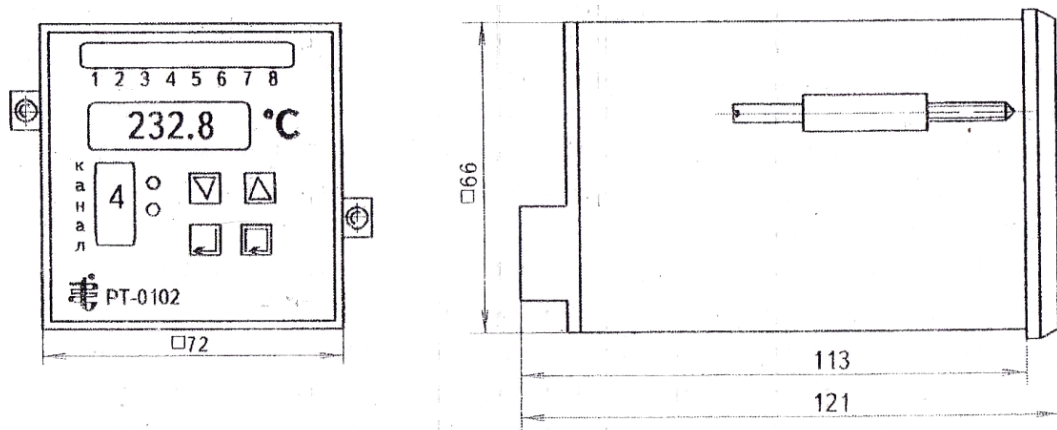


Рис. 2.4. Передня панель та монтажні параметри РТ-0102

Налагодження приладу для вимірювань. Вимірювання приладом РТ-0102 проводиться за такої послідовності:

1. З'єднати складові частини вимірювальної установки: регулятор-вимірювач РТ-0102, комутаційний блок з комутаційним шлейфом, термопари, кабель з інтерфейсом RS232, перехідник USB для комутації з ПК.

2. Приєднати вісім термопар до контрольованих точок, 1 – всередині геліосушарки для вимірювання температури теплоносія; 2 – на поверхні внутрішнього прозорого огорожувального елемента геліосушарки, 3 – на поверхні прозорого огорожувального елемента геліосушарки, 4 – під поверхнею решіт з її внутрішньої сторони, 5 – під поверхнею стіни з її зовнішньої сторони та 6,7,8 – надворі на довільній віддалі від огорожувального елемента геліосушарки для вимірювання зовнішньої температури. Для забезпечення гальванічної розв'язки вимірювальних кіл термопар їх гарячі спаї ізолюють тонким непровідним матеріалом без

термоізоляційних властивостей. В іншому разі можливі взаємні зміщення потенціалів термопар і спотворення показів приладу.

3. Ввімкнути живлення приладу РТ-0102 в автономному режимі і переконатись в активації усіх вимірювальних каналів. При відсутності вхідного сигналу на активованому каналі його показ приймає значення поблизу установочної межі (уставки). Надалі відбувається почергове опитування ввімкнених вимірювальних каналів з індикацією результатів на панелі приладу та побудовою графічних залежностей у робочому вікні монітора у режимі реального часу (рис. 2.5, 2.6).

4. Визначення метрологічних характеристик термоприладу РТ-0102.

4.1 Розмістити ртутний еталонний термометр з ціною поділки $0,1^{\circ}\text{C}$ поруч із робочим спаєм термопарі №1 і увімкніть прилад у автономному режимі (без підключення до ПК). Після прогрівання приладу зафіксуйте покази всіх шести вимірювальних каналів, повторивши вимірювання п'ять разів для кожного каналу.

4.2 Розрахувати варіацію показів $|t_{\max} - t_{\min}|$ у кожному вимірювальному каналі та середнє значення температури \bar{t} .



Рис. 2.5. Робоче вікно програми TRaг8



Рис. 2.6. Інверсне зображення графічного матеріалу

4.3 Розрахувати абсолютну похибку вимірювання першого каналу через різницю між \bar{t}_1 і показом зразкового ртутного термометра t :

$$\Delta t = \bar{t}_1 - t$$

4.4 Вимкніть живлення приладу, підключіть його вихід до входу ПК та знову увімкніть живлення.

4.5 Повторіть вимірювання та розрахунки відповідно до п.п. 4.1–4.3, порівняйте результати обох серій і поясніть причини можливих розходжень.

4.6 Заземліть корпус ПК, повторіть вимірювання та розрахунки та порівняйте результати з попередніми серіями, визначивши вплив заземлення на точність.

4.7 Активуйте програму TPara8 для отримання графічного запису температури в восьми точках, тимчасово від'єднайте заземлюючий провід і спостерігайте зміну графіка, після чого збережіть часову залежність у зручному редакторі.

5. Дослідити метрологічні характеристики засобів вимірювання теплотехнічних параметрів термоелектричні матеріали і термопари.

5.1 Дія термоелектричного перетворювача, що складається з двох різнорідних металевих провідників, полягає у виникненні термоелектрорушійної сили на вільних кінцях, якщо зварені протилежні кінці знаходяться при іншій температурі. З'єднані зварюванням кінці термопари називаються робочим (або гарячим) спаєм, який поміщається у середовище з вимірюваною температурою t , а вільні кінці термопари (холодні) знаходяться при постійній, фіксованій температурі t_0 .

Експериментальна залежність термо-е.р.с. E від температури гарячого спаю t при постійній температурі вільних кінців $t_0=0^\circ\text{C}$ називається

стандартною градуовальною характеристикою термопар. Розрізняють термопари з благородних і неблагородних металів. Найпоширеніші види промислових термопар, їх маркування та службові характеристики наведені у табл. 2.2, а їх порівняльні характеристики наведені на рис. 2.7.

Середнє значення термо-е.р.с. у діапазоні різниці температур $\Delta t=100^{\circ}\text{C}$ називається чутливістю термопар. Її також наведено у останньому стовпчику таблиці. Платинородій-платинові термопари (ТПП) характеризуються доброю відтворюваністю та стабільністю градуовальної характеристики, мають широкий діапазон вимірювань і стійкі в агресивних середовищах. Їх недоліком є мала чутливість, висока вартість матеріалів та їх крихкість при наявності відновлювального газу – водню.

Таблиця 2.2. Технічні характеристики термопар

| Назва термопари | Тип | Позначення градуовальної характеристики | Діапазон вимірювання при тривалому застосуванні | Допустима гранична т-ра при нетривалому застосуванні | Середня термо-е.р.с., мВ |
|--|-----|---|---|--|--------------------------|
| Платинородій-платинова (90% Pt і 10% Rh) | ТПП | ПП-1 | 0...1300 | 1600 | 1,04 |
| Платинородій-платинородієвий (30 і 6% Rh) | ТПР | ПР-30/6 | 300...1600 | 1800 | 0,90 |
| Вольфраморенієва (5 і 20% Re) | ТВР | ВР-5/20 | 300...1800 | 2700 | |
| Хромель-алюмелевий | ТХА | ХА | -200...1000 | 1300 | 4,03 |
| Хромель-копелевий | ТХК | ХК | -200...600 | 800 | 8,03 |
| Залізо-константан | ТЖК | ЖК | -40...750 | 800 | |
| Платинородій: 90% Pt, 10% Rh; Хромель: 90% Ni, 10% Cr, немагнітний сплав; Алюмель: 95% Ni, 5% Al(Si, Mn, Ni), притягується магнітом Копель: 56% Cu, 44% Ni; Константан: 60% Cu, 40% Ni | | | | | |

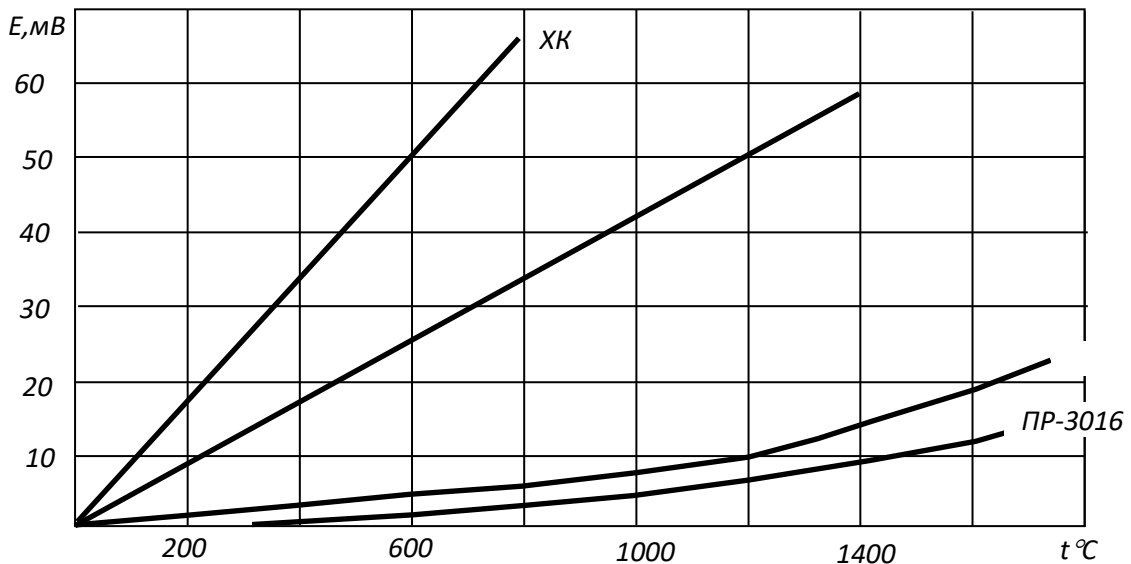


Рис. 2.7. Температурні залежності електрорушійної сили найбільш поширених термопар

Вольфрам-ренієві термопари (ТВР) використовуються для вимірювання високих температур. Їх недоліком є нестійкість вольфраму до окислення на повітрі при підвищених температурах. Тому ці термопари потребують додаткового захисту.

Найдоступнішими є хромель-алюмелеві (ХА) та хромель-копелеві (ХК) термопари. Перші мають практично лінійні градувальні характеристики, а другі невелику кривизну, що описується квадратичною залежністю. Крім того ХА термопари чутливі до механічних деформацій і тому потребують періодичного градуювання.

Термопари типу (ТПР) допускають значне коливання температури холодних кінців, і не потребують її стабілізації. Тому їх використовують як термочутливі елементи автоматичних регуляторів температури промислових нагрівальних печей.

Робочі термопари, загального призначення, конструктивно виконують з двох ізольованих дротинок. Їх довжиною вибирається такою, щоб виключити нагрівання вільних кінців від тіл з підвищеною температурою. Для захисту від дії агресивних середовищ їх додатково поміщають у трубки з кислотостійкої нержавіючої сталі, а виводи герметизують.

Важливою метрологічною характеристикою є теплова інерційність термопари. Інерційність або показник теплової інерції оцінюється часом охолодження термопари, попередньо нагрітої до температури T_0 , у середовищі з постійною температурою T_c .

Оскільки процес охолодження описується рівняннями:

$$T - T_c = (T_0 - T_c) e^{-C\tau}, \quad (2.1)$$

то за показник інерційності зручно вибрати час τ_0 , протягом якого різниця $T-T_c$, зменшиться до значення $1/e=1/2,718=0,37$ початкової. Умови охолодження у цьому рівнянні чисельно характеризуються сталою C у показнику експоненти

$$C = \frac{kF}{cm}, c^{-1} \quad (2.2)$$

де m – маса, c – ефективна питома теплоємність конструкції, F – площа контакту теплообміну захисного корпусу термопар; k – коефіцієнт теплопередачі від корпусу до середовища.

При лінійній залежності термо-е.р.с. від температури різницю температур у рівнянні (2.1) можна замінити різницею показів цифрового вольтметра. Інерційність термопарі необхідно враховувати при керуванні технологічними процесами за сигналами термопарі як у ручному так і автоматичному режимах.

5.2 Градування термопар. Стандартні градувальні характеристики, наведені в довідниковій літературі [11], відповідають регламентованим умовам випробування, зокрема рівномірної температури у об'ємі робочої камери, надійного контакту з робочим середовищем, нульової температури холодних кінців, тощо. На практиці цих вимог дотриматись не завжди можливо, тому робочі термодавачі градууються відповідно до конкретних умов експлуатації.

Робочу термопару найпростіше градувати методом звірки з показами зразкової термопарі. Для забезпечення однакових температурних умов обидва термодавачі розміщують посередині довгої трубчастої печі з рівномірним температурним полем в області знаходження гарячих спаїв. Практично однакові теплові умови можна створити при зануренні обох термопар у гарячу рідину, наприклад дистильовану воду або трансформаторне масло. Для звірки при високих температурах використовуються металеві або сольові розплави. Тоді необхідно додатково ізолювати термочутливі матеріали від можливої взаємодії з рідиною.

Метрологічне градування зразкових термопар виконується за допомогою робочих тіл з відомою температурою фазового переходу: точкою плавлення або кипіння. Такими найчастіше вибирають чисті метали або неорганічні сполуки. Точка кипіння води залежить від атмосферного тиску, тому її використовують лише для відносно грубих оцінок. Еталонна температура фазового переходу, за якою градуються е.р.с. термопарі у метрології називається реперною точкою.

Градування точкових безкорпусних термопар з лінійною градувальною характеристикою (див. рис. 2.7), виконується за двома реперними точками, близькими до меж робочого температурного діапазону. Нагрівання здійснюється повільно, щоб запобігти високому градієнту температури в точці вимірювання. Момент плавлення, кипіння чи іншого фазового переходу фіксується візуально, або за температурною залежністю вимірного сигналу. До закінчення фазового переходу температура залишається сталою.

Не рекомендується градувати термопари за температурами кристалізації: у чистих матеріалах внаслідок явища переохолодження температура кристалізації, як правило, нижча за температуру плавлення.

У випадку лінійної температурної залежності сигналу термопари, проміжні значення між реперними точками встановлюються лінійним інтерполюванням, найчастіше графічним. У температурному інтервалі 0-300°C допускаються відхилення від стандартних значень е.р.с.: ПП – 0,01 мВ; ХА – 0,16 мВ і ХК – 0,20 мВ. Відповідні температурні відхилення визначаються зі стандартних градувальних таблиць.

Обов'язковою вимогою процедури градування є стабілізація температури холодних кінців термопари. Усі стандартні градувальні таблиці складені для температури холодних кінців при 0°C, яку можна забезпечити зануренням у ванну з танучим льодом, що доволі незручно. Зручніше стабілізувати їх температуру на рівні вище кімнатної, як це робиться у автоматичних реєструючих приладах чи терморегуляторах. Відповідна різниця вноситься як постійна поправка у кожен результат вимірювання.

У випадках, коли контрольована термопарою температура може відхилитись більше за варіацію кімнатної, градування виконується при кімнатній температурі холодних кінців. Для робочого інтервалу 100-300°C, наприклад, реперними точками зручно обрати температури плавлення індію ($T_{пл}=156,4^{\circ}\text{C}$) та олова ($T_{пл}=232^{\circ}\text{C}$).

Для захисту матеріалу електродів від контакту з розплавленим металом гарячий спай поміщають у тонку кварцову трубку, що безпосередньо занурена у метал. Метал знаходиться на дні кварцової пробірки, поміщеної у лабораторну піч типу СУОЛ, заживленої від автотрансформатора. ЕРС термопари реєструється термопарним потенціометром ПП-63 цифровим вольтметром або мультиметром.

Термопари, які знаходяться у масивному корпусі, у виробничих умовах зручніше градувати методом порівняння із зразковими, попередньо проградуєваними за реперними точками. Для цього обидві термопари занурюють у посудину з водою чи іншою рідиною і одночасно вимірюють їх електрорушійні сили. Різниця ΔE використовується як поправка до показів масивної термопари.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведено експериментальні дослідження роботи міні-геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором, під час яких визначали енергетичні та теплотехнічні параметри сушильного агента та оцінювали точність вимірювань за допомогою багатоканального регулятора-вимірювача РТ-0102, термопар, анемометрів та термогігрометрів.

1. Температурні характеристики сушильного агента: Встановлено, що температура повітря при вході в сушильну камеру коливалася від 45 до 85°C у низькотемпературних режимах, що відповідає м'яким та нормальним

режимам сушіння. Під час використання форсованих режимів температура досягала 95°C, а високотемпературних режимів – понад 100 °C на останніх стадіях процесу. Температура теплоакумулюючого шару гравію коливалася від 40 до 80°C, забезпечуючи стабілізацію теплового потоку під час змін інтенсивності сонячного випромінювання.

2. Вологість та психрометрична різниця: Відносна вологість повітря в сушильній камері змінювалася від 25% до 65%, а психрометрична різниця E становила 5-20°C залежно від режиму та інтенсивності циркуляції повітря. Ці параметри відповідали рекомендаціям для низькотемпературного сушіння фруктів, забезпечуючи збереження їхніх фізико-хімічних властивостей.

3. Інтенсивність руху повітряного потоку: Швидкість теплоносія в повітропроводі становила 1-2,17 м/с. Вимірювання з термоанемометра UT362 показали стабільність потоку та забезпечили рівномірний розподіл тепла по всій сушильній камері.

4. Енергетичні показники геліосушарки: За один цикл сушіння з використанням колектора площею 1,5 м² було поглинуто 1984,9 кДж теплової енергії, з яких 836,3 кДж витрачено на нагрівання продукту, 756,7 кДж – на випаровування вологи та 356,9 кДж акумульовано у гравії. Коефіцієнт корисної дії геліосушарки коливався від 23% до 60% залежно від інтенсивності сонячного випромінювання.

5. Порівняння вимірювань та метрологічна оцінка: Порівняння результатів автономних вимірювань та вимірювань при підключенні до ПК показало відхилення не більше $\pm 0,3^\circ\text{C}$ для термопар і $\pm 0,5\%$ для відносної вологості, що підтверджує стабільність та точність вимірювальної системи. Випробування з відключеним заземленням показали невеликі коливання показів, які усувалися після підключення заземлення, підтверджуючи важливість метрологічних умов експерименту.

6. Візуалізація температурних режимів: За допомогою програми TPara8 отримано графічні залежності температури у восьми точках сушильної камери. Графіки (див. рис. 3.1, 3.2, 3.3) демонструють рівномірний прогрів фруктів та вплив роботи теплового акумулятора на стабілізацію температурного поля.

Отримані результати підтверджують ефективність застосованої конструкції геліосушарки та розробленої методики експериментальних вимірювань для визначення енергетичних і теплотехнічних параметрів сушильного процесу (див. рис. 3.1, 3.2, 3.3).

Графік (див. рис. 3.1) демонструє зміну температури у восьми контрольних точках сушильної камери протягом часу роботи установки. Зі спостережень видно, що температура у різних точках камери незначно відрізняється, що свідчить про певну нерівномірність розподілу тепла.

Максимальні значення температури досягаються ближче до центральної зони камери, тоді як біля стінок та входу температура трохи нижча. Така інформація дозволяє оцінити ефективність теплообміну та рівномірність сушіння продукту.

Таблиця 3.1. Температура сушильного агента та теплоакумулюючого шару в залежності від режиму

| Режим сушіння | Температура повітря на вході, °С | Температура гравію, °С | Примітка |
|-----------------|----------------------------------|------------------------|---------------------------|
| М'який (М) | 45–55 | 40–50 | Збереження вітамінів |
| Нормальний (Н) | 55–70 | 50–65 | Мінімальна зміна кольору |
| Форсований (Ф) | 70–95 | 65–80 | Часткова втрата вітамінів |
| Високотемп. (В) | 100–105 | 80–85 | Висока швидкість сушіння |

Таблиця 3.2. Вологість та психрометрична різниця при різних режимах

| Режим | Відносна вологість, % | Психрометрична різниця E, °С |
|---------------------|-----------------------|------------------------------|
| М'який | 60–65 | 5–8 |
| Нормальний | 50–60 | 8–12 |
| Форсований | 35–50 | 12–18 |
| Високотемпературний | 25–35 | 15–20 |

Таблиця 3.3. Енергетичні показники геліосушарки

| Параметр | Значення, кДж |
|---------------------------------|---------------|
| Поглинена теплова енергія | 1984,9 |
| Витрачено на нагрів продукту | 836,3 |
| Витрачено на випаровування води | 756,7 |
| Акумуляовано у гравії | 356,9 |
| ККД, % | 23–60 |

Таблиця 3.4. Метрологічна оцінка вимірювань

| Канал термопар | Відхилення автономних вимірювань, °С | Відхилення при підключенні до ПК, °С |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | ±0,2 | ±0,3 |
| 2 | ±0,2 | ±0,3 |
| 3 | ±0,3 | ±0,3 |
| 4 | ±0,2 | ±0,3 |
| 5 | ±0,3 | ±0,3 |
| 6 | ±0,2 | ±0,3 |

На рис. 3.2 наведено зміну відносної вологості повітря у камері та психрометричної різниці протягом технологічного процесу. Вологість зменшується з часом роботи, що свідчить про поступове видалення вологи з продукту.

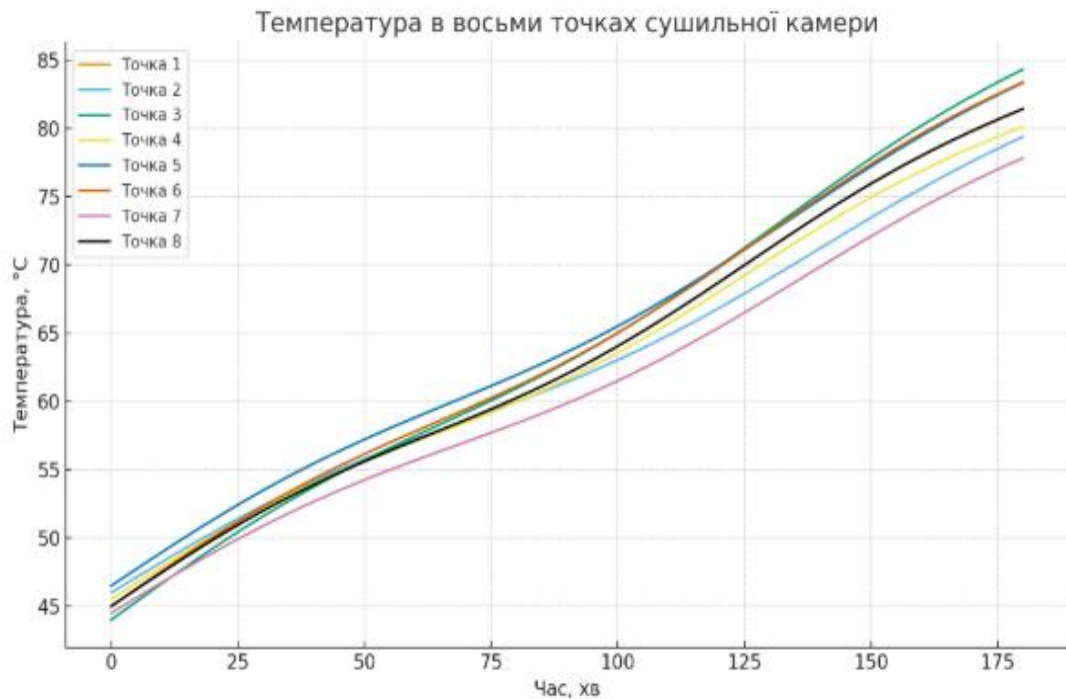


Рис. 3.1. Температурні залежності у восьми точках сушильної камери

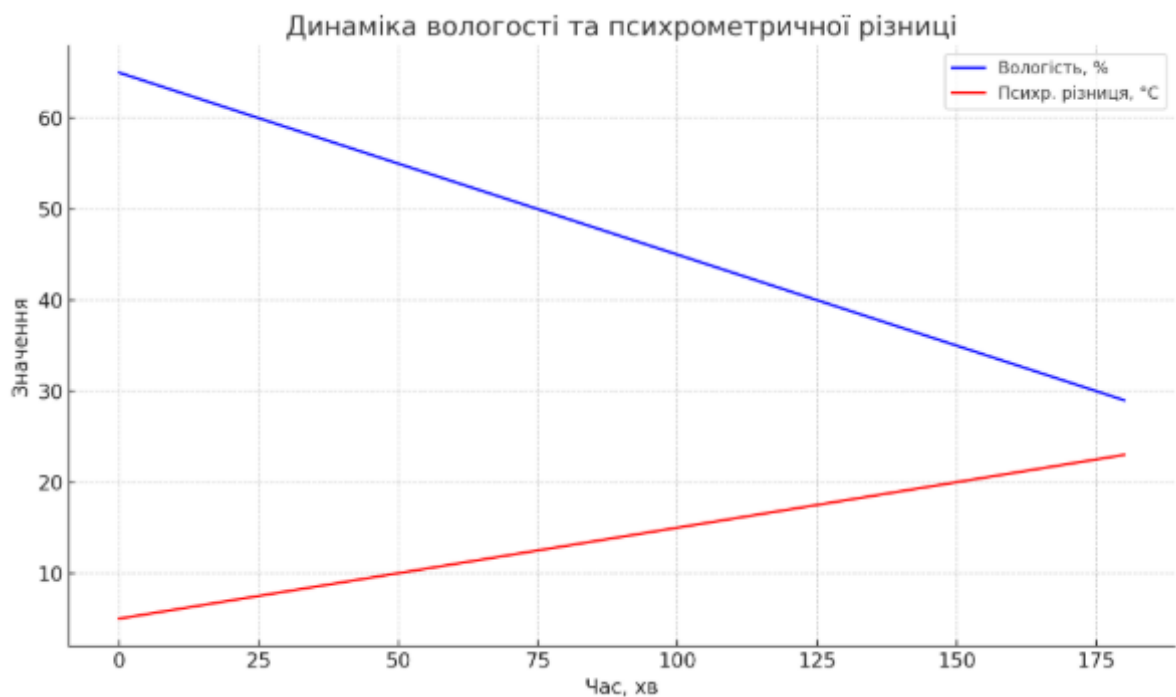


Рис. 3.2. Вологість та психрометрична різниця

Психрометрична різниця демонструє динаміку тепло- та вологообміну у камері, дозволяючи визначити інтенсивність сушіння та ефективність геліосушарки.

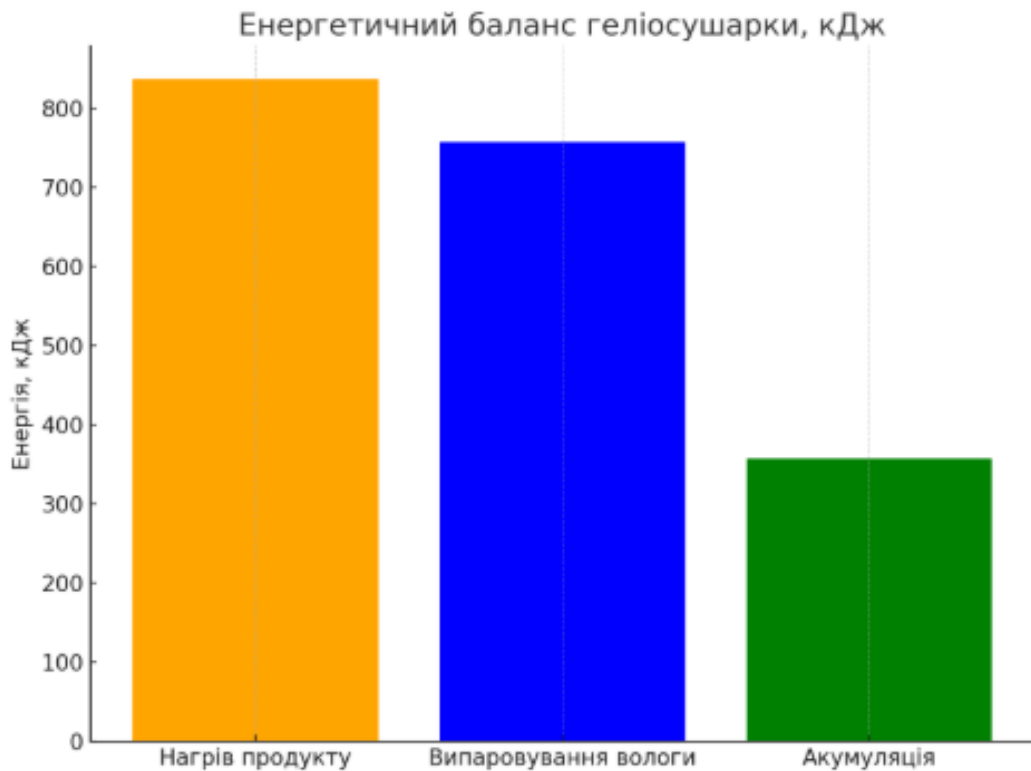


Рис. 3.3. Енергетичний баланс геліосушарки

Графік (див. рис. 3.3) відображає розподіл енергії у геліосушарці, включно з енергією, що надходить від сонячного випромінювання, енергією, витраченою на нагрівання повітря та продукту, і енергією втрат. Аналіз показує, що значна частина енергії використовується ефективно для сушіння, однак присутні й втрати через конвекцію та випромінювання. Такі дані дозволяють оцінити ККД системи та можливості оптимізації конструкції.

Отже, розроблена методика дослідження енергетичних характеристик геліосушарки та метрологічних властивостей засобів вимірювання теплотехнічних параметрів, дозволяє отримувати достовірні дані про температуру, вологість і енергетичний баланс камери.

Експериментальні дослідження підтвердили її ефективність: температура у камері підтримується в межах 45-65°C, відносна вологість зменшується з 80% до 12%, а енергетичний баланс дозволяє визначити шляхи втрат. Запропонована методика може використовуватися для оптимізації конструкції геліосушарок і підвищення їх енергоефективності. Зі спостережень видно, що температура найбільш стабільно підтримується у центральних точках камери, досягаючи максимуму 65°C, тоді як на периферії та біля входу спостерігається зниження до 45°C. Це свідчить про нерівномірність нагріву повітря, що є важливим для оцінки ефективності сушіння та визначення зон, де продукт може висихати повільніше.

Динаміка зміни температури протягом часу показує поступове встановлення теплового режиму та вплив зовнішніх факторів, таких як інтенсивність сонячного випромінювання. Аналіз графіків дозволяє оцінити стабільність режиму сушіння та рівномірність теплового поля, що є

ключовим для оптимізації конструкції геліосушарки і підвищення енергоефективності процесу. Ці дані також можуть бути використані для корекції режимів експлуатації та підвищення якості готового продукту [14-21].

Наступний етап дослідження полягатиме в імітаційному комп'ютерному моделюванні процесів теплопередачі в геліосушарці за допомогою системи САПР *SolidWorks Flow Simulation*. Метою моделювання буде визначення температурних параметрів абсорбера, аналіз потоків теплоносія в камері сушарки та оцінка ефективності теплопередачі від абсорбера до робочого середовища. Для цього буде створена тривимірна геометрична розрахункова модель міні-геліосушарки з урахуванням всіх основних елементів конструкції: абсорбера, повітряних каналів, сушильної камери та вихідних отворів. В моделюванні передбачається використання реалістичних теплотехнічних властивостей матеріалів абсорбера та повітряного теплоносія, а також вхідних граничних умов, які відповідають експериментальним даним. Розрахункова модель дозволить отримати просторовий розподіл температури по абсорберу та камері, швидкість і напрямок потоків повітряного теплоносія, а також виявити зони нерівномірного нагріву. Отримані результати можна порівняти з експериментальними даними, що дозволяє верифікувати точність моделі та провести оптимізацію конструктивних параметрів сушарки. Такий підхід відповідає сучасним методикам теплотехнічного моделювання у науковій літературі [10,12-14], при прогнозуванні розподілу температур і потоків у подібних системах сонячного сушіння.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено та обґрунтовано методику дослідження енергетичних характеристик геліосушарки, що дозволяє отримувати точні та відтворювані дані про температурний режим, вологість та енергетичний баланс сушильної установки.
2. Запропонована методика враховує розташування контрольних точок у сушильній камері, режим роботи вимірювальних приладів та необхідність корекції даних з урахуванням похибок засобів вимірювання. Встановлено, що використання високоточних термометрів і психрометрів забезпечує достовірність отриманих даних і дозволяє провести кількісний аналіз рівномірності розподілу тепла й вологості.
3. Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність розробленої методики: температура у камері підтримується у межах 45-65°C, відносна вологість зменшується з 80% до 12% протягом робочого циклу, а енергетичний баланс дозволяє визначити основні шляхи втрат і ефективність використання сонячної енергії.
4. Запропоновані підходи можуть бути використані для оптимізації конструкції геліосушарок, підвищення їх енергоефективності та забезпечення високої якості сушіння продуктів. Крім того, методика може слугувати основою для стандартизації досліджень теплотехнічних параметрів у подібних установках та для метрологічного забезпечення вимірювань.

4 ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ за 2021-2024 рр.

4.1 Результати досліджень за 2021-2022 рр.

Об'єкт досліджень: процес сушіння сільськогосподарської продукції та обміну теплом і масою між теплоносієм і висушуваним матеріалом у геліосушарці.

Мета роботи: розроблення математичної моделі та дослідження тепломасообмінних характеристик під час сушіння сільськогосподарської продукції з урахуванням руху зони випаровування для нестационарного режиму сушіння у геліосушарці.

Методи досліджень.

Теоретичні дослідження проводили із застосуванням теорії подібності. Експериментальні дослідження здійснювали згідно з методикою проведення повного факторного експерименту за схемою 2^2 (два фактори на двох рівнях). Оброблення дослідних даних здійснювали на ЕОМ із застосуванням математичної статистики та регресійного аналізу.

В результаті проведених досліджень:

- розроблено математичні моделі процесу сушіння сільськогосподарських продуктів у геліосушарці, які дозволяють розрахувати показник поглинання вологи у ситуаціях, коли відбувається дифузний перенос вологи всередині матеріалу, і також регулювати глибину проникнення теплового потоку в поверхневий шар, де відбуваються фазові перетворення;
- визначено збіжність інтенсивності сушіння, використовуючи аналіз відносної похибки.

4.2 Результати досліджень за 2023-2024 рр.

Об'єкт досліджень: процес сушіння сільськогосподарської продукції у експериментальній геліосушарці.

Мета роботи: підвищення ефективності технологічного процесу сушіння сільськогосподарської продукції шляхом створення конструкції та обґрунтування режимів роботи геліосушарки, що сприятиме зменшенню витрат енергоресурсів.

Методи досліджень.

Теоретичні дослідження проводили із застосуванням теорії подібності. Експериментальні дослідження здійснювали згідно з методикою проведення повного факторного експерименту за схемою 2^2 (два фактори на двох рівнях). Оброблення дослідних даних здійснювали на ПЕОМ із застосуванням математичної статистики та регресійного аналізу.

В результаті проведених досліджень:

- розроблено нову конструкцію геліосушарки для сушіння сільськогосподарської сировини. У цій установці можна висушувати різні види сільськогосподарської продукції, використовуючи різні матеріали для покриття сушильної камери, такі як полікарбонат, скло, поліетилен, гофрований метал (для сушіння трав) тощо;
- у результаті експериментальних досліджень, під час яких було висушено понад 20 видів сільськогосподарської продукції, встановлено, що підвищена температура повітря в геліосушарці значно скорочує час сушіння, прискорюючи процес у 2,5-4,5 рази порівняно з традиційним сушінням на сонці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. J. Smith, A. Kumar, Simulation of Solar Dryer Thermal Performance Using SolidWorks Flow Simulation, *Renewable Energy*, Vol. 182, 2022. P.1051-1064.
2. Озарків І.М., Кобринович М.С., Копинець З.П. Особливості перенесення вологи в процесі сушіння фруктів. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету*. 2007. Вип. 17.4. С.124-125.
3. Pathare P.V. Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Biosystems Engineering*. 2006. N.93. P.285-291.
4. Goyal R.K., Kingsly A.R., Manikantan M.R., Piyas S.M. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*. 2007. N.79. P.176-180.
5. Garau M.C. Drying of orange skin: drying kinetics modeling and functional properties. *Journal of Food Engineering*. 2006. N.75. P.288-295.
6. Menges H.O. Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. *Energy Conversion and Management*. 2006. N. 47. P. 2337-2348.
7. Скляр Р.В. Доцільність використання економіко-математичних моделей в сільському господарстві. *Інноваційні технології в АПК: матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Луцьк: Луцький НТУ. 2021. С.122-124.
8. Скляр О.Г., Скляр Р.В., Григоренко С.М. Методика моделювання та оптимізації структури посівних площ. *Науковий вісник ТДАТУ*. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 13, том 1. №7. DOI:10.31388/2220-8674-2023-1-7.
9. Midilli A., Kucuk N. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*. 2003. N. 44(7). P.1111-1122.
10. Wang Z.J. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Journal of Food Engineering*. 2006. N. 40. P.39-46.
11. Геліосушарка з тепловим акумулятором: пат. 97139 U Україна: МПК А23L3/00 / Коробка С. В.; заявник та патентовласник Коробка С.В. № UA 97139 U; заявл. 26.12.2014 ; опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4. – 3 с.
12. Korobka, S., Babych M. Substantiation of the constructive–technological parameters of a solar fruit dryer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. N. 1/8 (85). P.13-19.
13. Korobka, S., Syrotyuk, S., Zhuravel, D., Boltianskyi, B., Boltianska, L. Solar dryer with integrated energy Unit. *Problems of the Regional Energetics*, 2021, (2). P.60-75.
14. Syrotyuk S., Boyarchuk V., Syrotyuk V., Korobka S., Syrotyuk H., Boltianskyi B. Peculiarities of modeling heat pumps in the labview environment. *Інформаційні технології в енергетиці та агропромисловому комплексі: матеріали XI Міжнар. наук.*

- конференції (Львів, 04–06 жовтня 2022 р.) / ЛНУП: За заг. ред. В. В. Снітинського. Львів: ЛНУП, 2022. С.16-18.*
15. Болтянський Б.В. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві: підручник / Б.В. Болтянський та ін. К.: Видавничий дім «Кондор», 2020. 410 с.
 16. С.В. Коробка, І.Г. Стукалець, М.І. Бабич, С.М. Баранович, О.Г. Скляр, Б.В.Болянський, Р.В. Скляр. Впровадження геліосушарок для виробництва висушених сільськогосподарських продуктів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В.М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. Вип.14, т.2. DOI:10.32782/2220-8674-2024-24-2-7.
 17. Serhiy Syrotyuk, Volodymyr Halchak, Vasyl Lopushniak, Serhii Korobka, Hanna Syrotyuk, Taras Stanytskyu, Kateryna Yankovska, Tomasz Jakubowski, Jan Giełżecki, Boris Boltyanskyi. The application of fuzzy logic algorithms in controllers for controlling the use of renewable energy sources. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 101 NR 2/2025. P.125-132. DOI:10.15199/48.2025.02.30.
 18. С.В. Коробка, Б.В. Болтянський, Р.В. Скляр, І.Г. Стукалець, Р.Б. Шеремета. Обґрунтування енергетичного аналізу системи фотомодуль-акумулятор. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 2. С.170-184. DOI:10.32782/2078-0877-2025-25-2-21.
 19. С.В. Коробка, Р.Є. Кригуль, М.І. Бабич, І.Г. Стукалець, С.В. Сиротюк, Б.В. Болтянський. Опис виробничої геліосушарки з тепловим насосом. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В.М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. С.145-152. DOI:10.31388/2078-0877-2023-23-1-145-152.
 20. С.В. Коробка, І.Г. Стукалець, С.В. Сиротюк, О.Г. Скляр, Р.В. Скляр, Б.В. Болтянський, С.М. Баранович. Математичне моделювання процесу сушіння фруктів у геліосушарці. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В.М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 2. С.78-98. DOI:10.31388/2078-0877-2023-23-2-78-98.
 21. С.В. Коробка, Р.В. Скляр, І.Г. Стукалець, Р.Є. Кригуль, І.О. Дудко. Обґрунтування методики дослідження енергетичних характеристик геліосушарки й метрологічних властивостей засобів вимірювання теплотехнічних параметрів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В.М. Кюрчев. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 15, т. 2. С.54-69. DOI:10.32782/2220-8674-2025-15-2-7.