

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-7>

УДК 631.364:621.311.243

С. В. Коробка<sup>1</sup>, канд. техн. наукР. В. Скляр<sup>2</sup>, канд. техн. наукІ. Г. Стукалець<sup>1</sup>, канд. техн. наукР. Є. Кригуль<sup>1</sup>, канд. техн. наукІ. О. Дудко<sup>1</sup>

ORCID: 0000-0002-4717-509X

ORCID: 0000-0002-1547-5100

ORCID: 0000-0001-7107-4865

ORCID: 0000-0002-3061-9176

ORCID: 0009-0003-0389-9226

<sup>1</sup> Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: korobkasv@ukr.net

## ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕЛІОСУШАРКИ Й МЕТРОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

*Анотація.* У роботі представлено розроблення та обґрунтування методики дослідження енергетичних характеристик геліосушарки з урахуванням метрологічних властивостей засобів вимірювання теплотехнічних параметрів. Основна увага приділена визначенню впливу параметрів теплоносія, інтенсивності сонячного випромінювання та ефективності теплообміну на енергетичну продуктивність установки. Проведено аналіз точності вимірювань температури, вологості та швидкості повітря за допомогою термопарних сенсорів, що дало змогу встановити їх метрологічні характеристики та оцінити похибки вимірювань у реальних умовах експлуатації. Запропонована методика дає змогу комплексно оцінювати енергоефективність процесу сушіння, оптимізувати режими роботи геліосушарки та підвищити достовірність експериментальних даних. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій сонячних сушильних установок і розроблення систем контролю теплотехнічних параметрів у відновлюваних енергетичних технологіях.

*Ключові слова:* сонячна енергія, геліосушарка, температурно-вологісні поля, тепломасоперенесення, інтенсифікація, конвективне сушіння.

*Постановка проблеми.* У сучасних умовах дедалі більшого 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 їх ефективність значно 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 й 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].

*Аналіз останніх досліджень.* Проблема ефективного використання відновлюваних джерел енергії для технологічних процесів сільськогосподарського виробництва, зокрема сушіння



фруктів, овочів і зерна, є одним із ключових напрямів сучасної енергетичної науки. За даними досліджень [1–3], частка енергії, що витрачається на процеси сушіння, може становити до 25–30 % від загального енергоспоживання переробних підприємств агропромислового комплексу. З огляду на це, геліосушільні установки розглядаються як ефективна альтернатива традиційним системам, що працюють на викопному паливі, адже вони дають змогу зменшити споживання електроенергії та викиди CO<sub>2</sub> у довкілля.

Дослідження останніх років свідчать, що геліосушарки забезпечують високу якість висушеної продукції завдяки рівномірному розподілу теплового потоку та м'яким температурним режимам [4]. У роботах вітчизняних і зарубіжних авторів описано різні конструктивні рішення таких систем – від пасивних сушарок із природною циркуляцією повітря до активних установок з автоматичним керуванням температурою і вологістю [5; 6]. Проте ефективність їх роботи значно залежить від точності визначення енергетичних параметрів: температури теплоносія, швидкості повітря, щільності сонячного потоку, а також від надійності вимірювальних приладів.

У багатьох наукових роботах [7–21] відзначається, що похибки вимірювання температури в повітряних колекторах та камерах сушіння можуть досягати 5–10 %, що призводить до спотворення результатів розрахунків енергетичного балансу. Основним елементом систем контролю є терморезистори, метрологічні характеристики яких (чутливість, стабільність, інерційність) суттєво впливають на точність оцінки теплотехнічних параметрів. Недостатньо досліджені питання калібрування таких сенсорів у змінних умовах роботи геліосушарки – при коливаннях температури, вологості та швидкості потоку повітря.

Водночас енергетична ефективність геліосушарок визначається не лише конструкцією повітряного колектора чи якістю теплоізоляції, а й точністю методики експериментального визначення параметрів процесу. У наукових публікаціях [9; 10] подано різні підходи до оцінювання коефіцієнта корисної дії (далі – ККД) геліосушарок: за питомими енерговитратами, за відношенням теплоти випаровування вологи до енергії сонячного випромінювання або за енергетичним балансом між колектором, продуктом і теплоносієм. Проте відсутність уніфікованої методики призводить до труднощів у порівнянні результатів різних експериментів й унеможливає формування узагальнених критеріїв ефективності.

Окремі автори [11–21] наголошують на необхідності врахування динаміки зміни теплового потоку протягом дня, що потребує безперервного вимірювання параметрів із високою точністю. У цьому контексті особливого значення набуває дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання теплотехнічних параметрів, зокрема терморезисторів, термопар і психрометрів. Невизначеність результатів вимірювань безпосередньо впливає на достовірність визначення енергетичних характеристик установки – коефіцієнта тепловіддачі, енерговитрат, ефективності колектора та загального ККД системи.

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

Так, 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 дасть змогу комплексно аналізувати процес сушіння, забезпечуючи достовірність отриманих даних і можливість порівняння результатів для різних типів геліосушарок.



*Формулювання мети статті.* Метою дослідження є розроблення та обґрунтування методики дослідження енергетичних характеристик геліосушарки з урахуванням метрологічних властивостей засобів вимірювання теплотехнічних параметрів. Реалізація цієї мети дасть змогу підвищити точність оцінювання ефективності сушильних установок, оптимізувати їх роботу та сприятиме розвитку технологій енергозбереження в сільськогосподарському виробництві.

Відповідно до поставленої мети необхідно було виконати такі завдання:

1. Дослідити метрологічні характеристики засобів вимірювання теплотехнічних параметрів (термопар, анемометрів, психрометрів), оцінити їх похибки та стабільність у змінних умовах роботи геліосушарки.

2. Розробити експериментальну установку та методику проведення вимірювань, яка забезпечує високу точність визначення температури, вологості, швидкості повітряного потоку та інтенсивності сонячного випромінювання.

3. Оцінити вплив похибок вимірювальних приладів на результати визначення енергетичних характеристик і розробити рекомендації щодо підвищення точності вимірювань.

4. Запропонувати шляхи вдосконалення конструкції та режимів роботи геліосушарки, спрямовані на підвищення її енергоефективності та зменшення енергетичних втрат.

*Основна частина.* 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 застосовують 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.

У межах методики дослідження параметри сушильного агента контролюються за допомогою сенсорів і термопар із багатоканальними регуляторами, що дає змогу оцінити теплові характеристики, ефективність теплоаккумуляції та вплив на фізико-хімічні властивості сировини. Низькотемпературні режими сушіння, наведені в табл. 1, із 44 варіантами за температурою та відносною вологістю використовують як базові для експериментальної перевірки розробленої методики, що забезпечує точне визначення енергетичних та теплотехнічних показників геліосушарки.

Розроблено конструкцію мінігеліосушарки з тепловим акумулятором і плоским дзеркальним концентратором, призначену для сушіння фруктів, яка показана на рис. 1, 2.

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

Його конструкція дає змогу ефективно нагрівати теплоносій, що виконаний з листової міді товщиною 1 мм. Робоча поверхня горизонтальна й 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 подання атмосферного повітря в сушильну камеру, що забезпечує ефективну вентиляцію і підтримання потоку теплоносія, та



Рис. 1. Загальний вигляд лабораторної установки для дослідження параметрів геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором

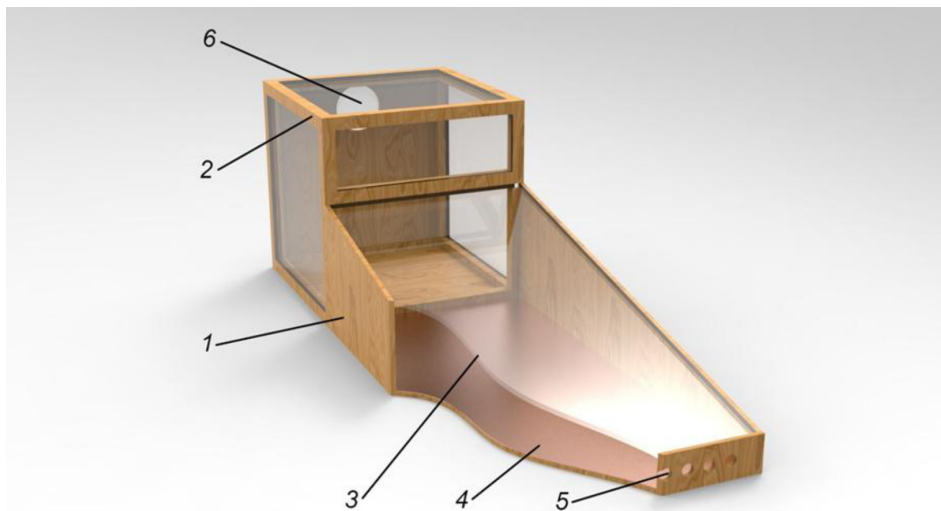


Рис. 2. Тривимірна геометрична розрахункова модель мінігеліосушарки

вихідні отвори (6) – отвори для виведення вологого повітря з камери. Ця конструкція дає змогу 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 підрегульованим кутом до горизонту. Рух теплоносія забезпечується вентилятором, а надлишкове тепло накопичується в тепловому акумуляторі, заповненому гравієм, який водночас є елементом стабілізації температурного режиму. Контроль температури, вологості та швидкості потоку здійснювали за допомогою термопар, анемометрів та термогігрометрів, під'єднаних до системи комп'ютерної реєстрації даних. Геліосушарка працює за принципом конвективного нагрівання повітря, яке, проходячи через теплоаккумулявальний шар, надходить у сушильну камеру й забезпечує рівномірне висушування фруктів. У похмурі періоди установка



функціонує завдяки теплу, накопиченому в акумуляторі, що дає змогу 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 застосовують датчі (сенсори), що перетворюють фізичні сигнали в 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 передавання 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. 3, а загальний вигляд і монтажні параметри – на рис. 4.

*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

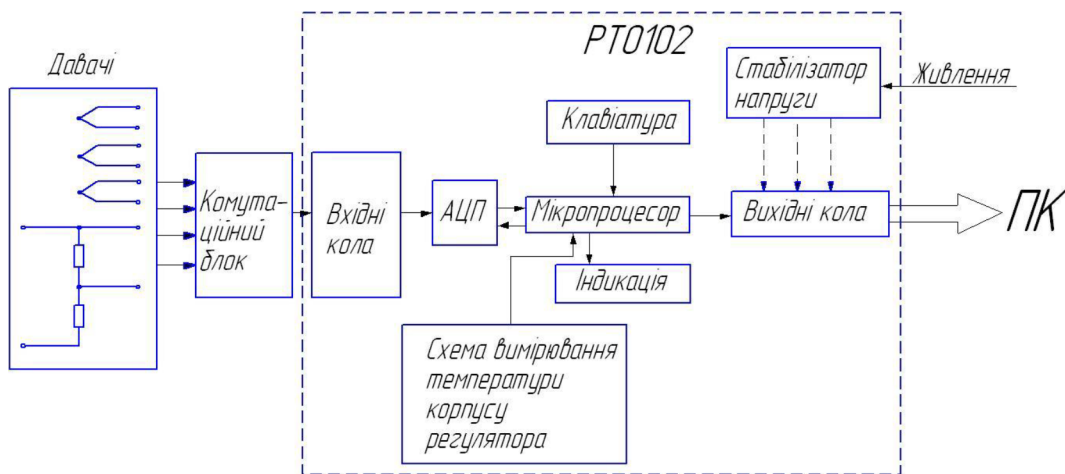


Рис. 3. Структурна схема вимірювача РТ-0102

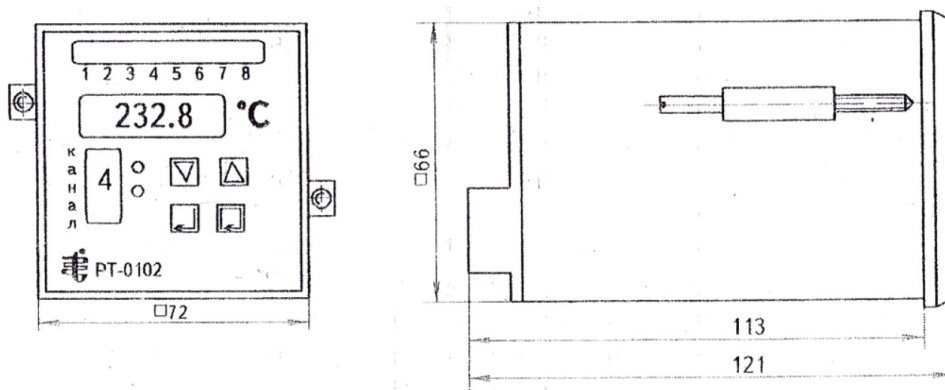


Рис. 4. Передня панель та монтажні параметри РТ-0102

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. Увімкнути живлення приладу RT-0102 в автономному режимі й переконатися в активації всіх вимірювальних каналів. За відсутності вхідного сигналу на активованому каналі його показ приймає значення поблизу установочної межі (уставки). Надалі відбувається почергове опитування увімкнених вимірювальних каналів з індикацією результатів на панелі приладу та побудовою графічних залежностей у робочому вікні монітора в режимі реального часу (рис. 5, 6).



Рис. 5. Робоче вікно програми TRaga8

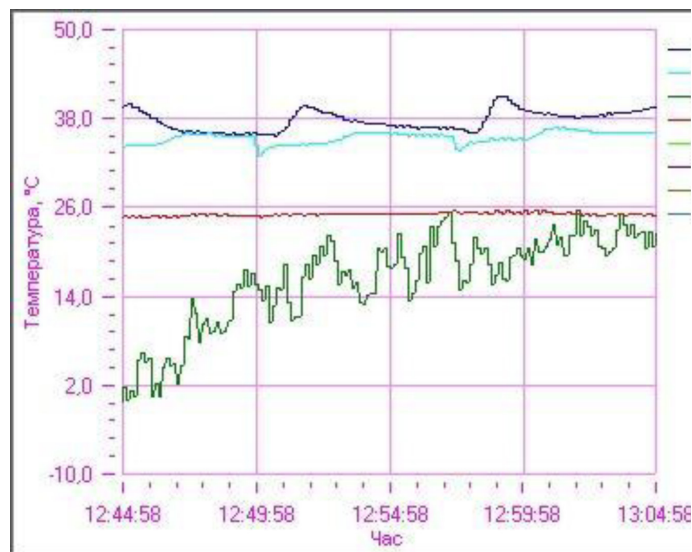


Рис. 6. Інверсне зображення графічного матеріалу



#### 4. Визначення метрологічних характеристик термоприладу РТ-0102.

4.1. Розмістіть ртутний еталонний термометр з ціною поділки  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  поруч із робочим спаєм термопари № 1 й увімкніть прилад в 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  $\bar{t}$ .

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 й порівняйте результати з попередніми серіями, визначивши вплив заземлення на точність.

4.7. Активуйте програму TRaga8 для отримання графічного запису температури у восьми точках, тимчасово від'єднайте заземлювальний провід і спостерігайте зміну графіка, після чого збережіть часову залежність у зручному редакторі.

5. Дослідіть метрологічні характеристики засобів вимірювання теплотехнічних параметрів термоелектричні матеріали й 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 перебувають за іншої температури. З'єднані зварюванням кінці термопари називаються робочим (або гарячим) спаєм, який поміщається в середовище з вимірюваною температурою  $t$ , а вільні кінці термопари (холодні) перебувають за постійної, фіксованої температури  $t_0$ .

Експериментальна залежність термо-е.р.с.  $E$  від температури гарячого спаю  $t$  за постійної температури вільних кінців  $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  називається стандартною градуювальною характеристикою термопари. Розрізняють термопари з благородних і неблагородних металів. Найпоширеніші види промислових термопар, їх маркування та службові характеристики наведені в табл. 2, а їх порівняльні характеристики – на рис. 7.

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

Вольфрам-ренієві термопари (далі – ТВР) використовують 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 градуювальні характеристики, а другі невелику кривизну, що описується квадратичною залежністю. Крім того, ХА термопари чутливі до механічних деформацій, тому потребують періодичного градуювання.

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

Таблиця 2

## Технічні характеристики термопар

Назва термопари	Тип	Позначення градувальної 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

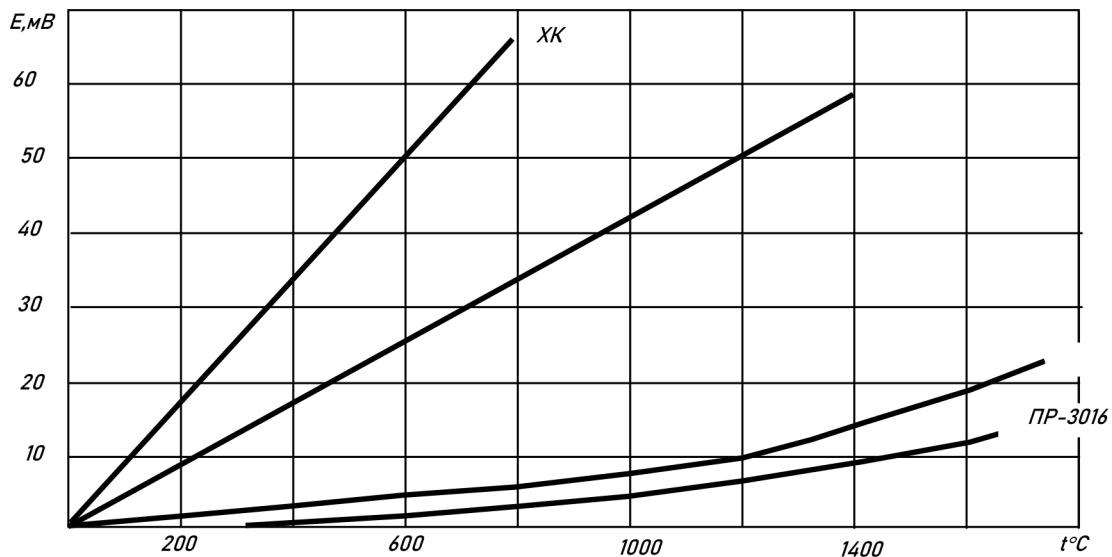


Рис. 7. Температурні залежності електрорушійної сили найбільш поширених термопар

Робочі термопари загального призначення конструктивно виконують з двох ізольованих дртинок. Їх довжина 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:

$$T - T_c = (T_0 - T_c)e^{-Ct}, \quad (1)$$

то за показник інерційності зручно вибрати час  $\tau_0$ , протягом якого різниця  $T - T_c$  зменшиться до значення  $1/e = 1/2,718 = 0,37$  початкової. Умови охолодження в цьому рівнянні чисельно характеризуються сталою  $C$  у показнику експоненти

$$C = \frac{kF}{cm}, \text{ c}^{-1} \quad (2)$$

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

За лінійної залежності термо-е.р.с. від температури різницю температур у рівнянні (1) можна замінити різницею показів цифрового вольтметра. Інерційність термопарі необхідно враховувати при керуванні технологічними процесами за сигналами термопарі як у ручному, так і в автоматичному режимах.

5.2. Градування термопар. Стандартні градувальні характеристики, наведені в довідниковій літературі [11], відповідають регламентованим умовам випробування, зокрема рівномірної температури в об'ємі робочої камери, надійного контакту з робочим середовищем, нульової температури холодних кінців тощо. На практиці цих вимог дотриматися не завжди можливо, тому робочі термодавачі градуються 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 трубчастой печі з рівномірним температурним полем в ділянці знаходження гарячих спаїв. Майже однакові теплові умови можна створити при зануренні обох термопар у гарячу рідину, наприклад дистильовану воду або трансформаторне масло. Для звірки за високих температур використовують 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 (рис. 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 термопарі за температурами кристалізації: у чистих матеріалах внаслідок явища переохолодження температура кристалізації, як правило, нижча за температуру плавлення.

У разі лінійної температурної залежності сигналу термопарі, проміжні значення між реперними точками встановлюються лінійним інтерполюванням, найчастіше графічним. У температурному інтервалі 0–300 оС 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 термопарі. Усі стандартні градувальні таблиці складені для температури холодних кінців при 0 оС, яку можна забезпечити зануренням у ванну з талим льодом, що доволі незручно. Зручніше стабілізувати їх температуру на рівні вище кімнатної, як це робиться в автоматичних реєструвальних приладах чи терморегуляторах. Відповідна різниця вноситься як постійна поправка в кожен результат вимірювання.

У випадках, коли контрольована термопарою температура може відхилитися більше за варіацію кімнатної, градування виконується за кімнатної температури холодних кінців. Для



робочого інтервалу 100–300 оС, наприклад, реперними точками зручно обрати температури плавлення індію ( $T_{пл} = 156,4$  °С) та олова ( $T_{пл} = 232$  °С).

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

Термопари, які містяться в масивному корпусі, у виробничих умовах зручніше градувати методом порівняння зі зразковими, попередньо проградуйованими за реперними точками. Для цього обидві термопари занурюють у посудину з водою чи іншою рідиною і одночасно вимірюють їх електрорушійні сили. Різницю  $\Delta E$  використовують як поправку до показів масивної термопари.

Проведено експериментальні дослідження роботи мінігеліосушарки 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: установлено, що температура повітря при вході в сушильну камеру коливалася від 45 до 85 °С у низькотемпературних режимах, що відповідає м'яким та нормальним режимам сушіння. Під час використання форсованих режимів температура досягала 95 °С, а високотемпературних режимів – понад 100 °С на останніх стадіях процесу. Температура теплоаккумулятивного шару гравію коливалася від 40 до 80 °С, 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 °С 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 УТ362 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 м<sup>2</sup> 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 більш ніж  $\pm 0,3$  °С 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 TRa8 отримано графічні залежності температури у восьми точках сушильної камери. Графіки (див. рис. 7, 8, 9) 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. 7, 8, 9).

Таблиця 3

Температура сушильного агента та теплоакумулювального шару залежно 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 4

Вологість та психрометрична різниця при різних режимах

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

Таблиця 5

Енергетичні показники геліосушарки

Параметр	Значення, кДж
Поглинена теплова енергія	1984,9
Витрачено на нагрів продукту	836,3
Витрачено на випаровування вологи	756,7
Акумульовано в гравії	356,9
ККД, %	23–60

Таблиця 6

Метрологічна оцінка вимірювань

Канал термопари	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

Графік (рис. 7) демонструє зміну температури у восьми контрольних точках сушильної камери протягом часу роботи установки. Зі спостережень видно, що температура в 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 дає змогу оцінити ефективність теплообміну та рівномірність сушіння продукту.

На рис. 8 наведено зміну відносної вологості повітря в камері та психрометричної різниці протягом технологічного процесу. Вологість зменшується із часом роботи, що свідчить про поступове видалення вологи з продукту.

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

Графік відображає розподіл енергії в геліосушарці на рис. 9, 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

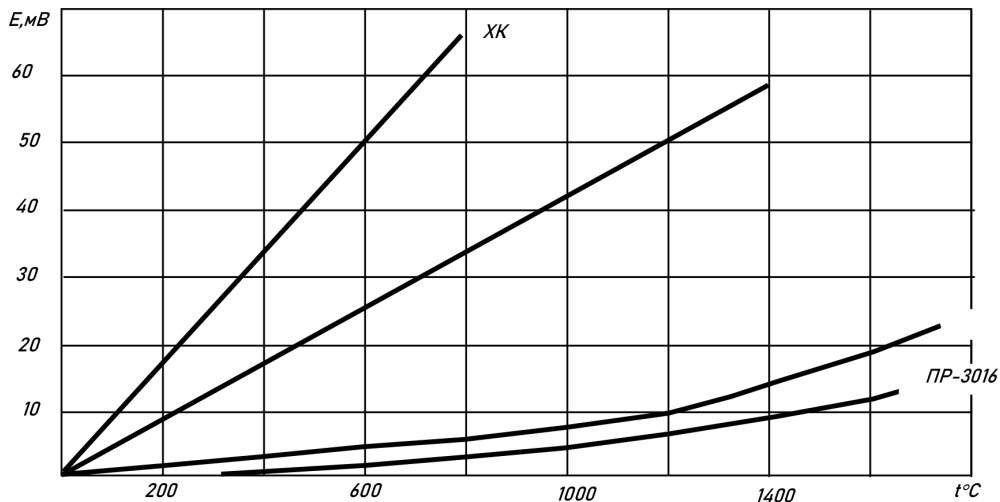


Рис. 7. Температурні залежності у восьми точках сушильної камери

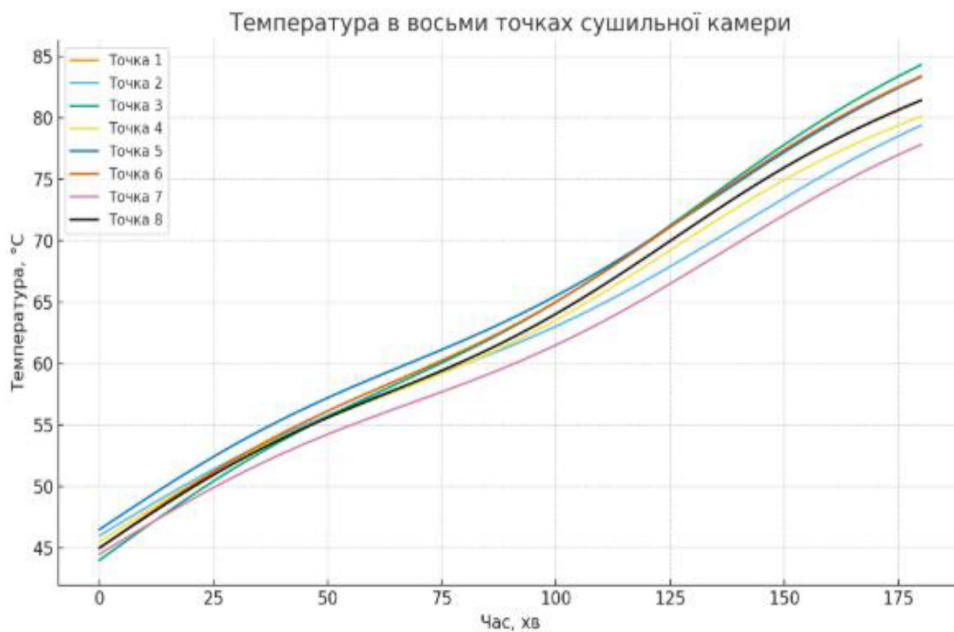


Рис. 8. Вологість та психрометрична різниця

сушіння, однак наявні й втрати через конвекцію та випромінювання. Такі дані дають змогу оцінити ККД системи та можливості оптимізації конструкції.

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

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

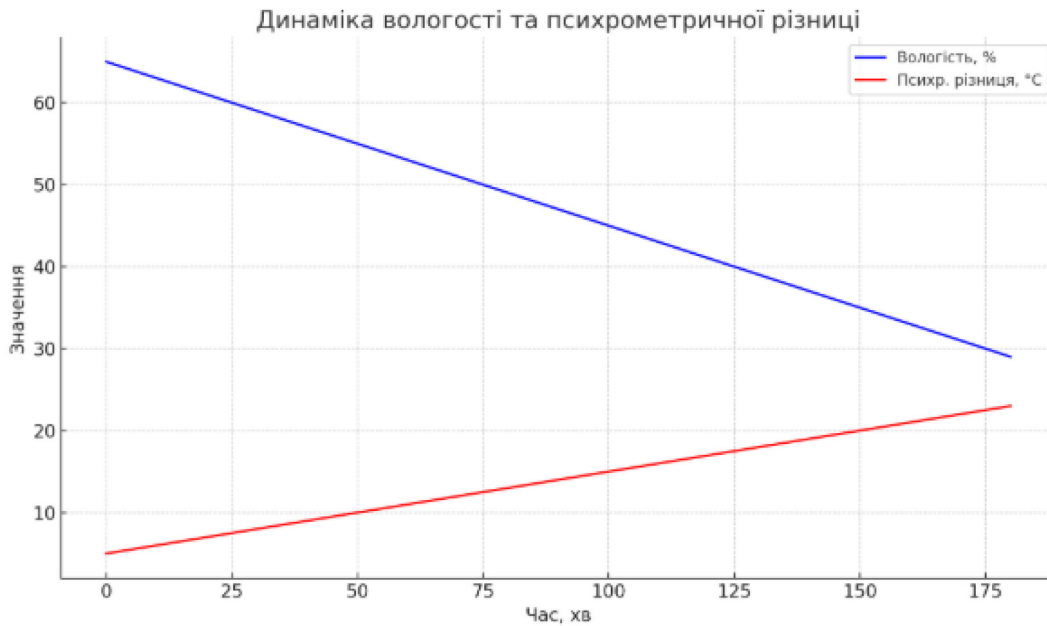


Рис. 9. Енергетичний баланс геліосушарки

Динаміка зміни температури протягом часу показує поступове встановлення теплового режиму та вплив зовнішніх факторів, як-от інтенсивність сонячного випромінювання. Аналіз графіків дає змогу оцінити стабільність режиму сушіння та рівномірність теплового поля, що є ключовим для оптимізації конструкції геліосушарки й підвищення енергоефективності процесу. Ці дані також можуть бути використані для корекції режимів експлуатації та підвищення якості готового продукту.

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 мінігеліосушарки з урахуванням усіх основних елементів конструкції: абсорбера, повітряних каналів, сушильної камери та вихідних отворів. У моделюванні передбачається використання реалістичних теплотехнічних властивостей матеріалів абсорбера та повітряного теплоносія, а також вхідних граничних умов, які відповідають експериментальним даним. Розрахункова модель дасть змогу 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 дає змогу верифікувати точність моделі та провести оптимізацію конструктивних параметрів сушарки. Такий підхід відповідає сучасним методикам теплотехнічного моделювання в науковій літературі [12], при прогнозуванні розподілу температур і потоків у таких системах сонячного сушіння.

*Висновки.* У роботі розроблено та обґрунтовано методику дослідження енергетичних характеристик геліосушарки, що дає змогу отримувати точні та відтворювані дані про температурний режим, вологість та енергетичний баланс сушильної установки.

Запропонована методика враховує розташування контрольних точок у сушильній камері, режим роботи вимірювальних приладів та необхідність корекції даних з урахуванням похибок засобів вимірювання. Установлено, що використання високоточних термометрів і психрометрів забезпечує достовірність отриманих даних і дає змогу здійснити кількісний аналіз рівно-



мірності розподілу тепла й вологості. Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність розробленої методики: температура в камері підтримується в межах 45–65 °С, відносна вологість зменшується з 80 % до 12 % протягом робочого циклу, а енергетичний баланс дає змогу визначити основні шляхи втрат й ефективність використання сонячної енергії.

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 таких установках та для метрологічного забезпечення вимірювань.

#### Список використаних джерел

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., Ilyas 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. Коробка С. В. Геліосушарка з тепловим акумулятором: пат. 97139 У Україна: МПК А23L3/00 / 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. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2020. 410 с.
16. Коробка С. В., Стукалець І. Г., Бабич М. І., Баранович С. М., Скляр О. Г., Болянський Б. В., Скляр Р. В. 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. Коробка С. В., Болтянський Б. В., Скляр Р. В., Стукалець І. Г., Шеремета Р. Б. 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. Ковальов О. О., Самойчук К. О., Болтянський Б. В., Гулевський В. Б., Панов І. С. Впровадження культури сортування сміття в Україні: проблеми та позитивний досвід розвинених країн. 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. 157–162. DOI:10.32782/2078-0877-2025-25-2-19

20. Коробка С. В., Кригуль Р. Є., Бабич М. І., Стукалець І. Г., Сиротюк С. В., Болтянський Б. В. 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.

21. Коробка С. В., Стукалець І. Г., Сиротюк С. В., Скляр О. Г., Скляр Р. В., Болтянський Б. В., Баранович С. М. 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

*Стаття надійшла до редакції 29.10.2025*

*Стаття прийнята 12.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**S. Korobka<sup>1</sup>, R. Skliar<sup>2</sup>, I. Stukalets<sup>1</sup>, R. Krygul<sup>1</sup>, I. Dudko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv

<sup>2</sup> Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

## **JUSTIFICATION OF THE METHODOLOGY FOR INVESTIGATING THE ENERGY CHARACTERISTICS OF A SOLAR DRYER AND THE METROLOGICAL PROPERTIES OF MEANS FOR MEASURING THERMAL PARAMETERS**

### *Summary*

The study presents the development and justification of a methodology for investigating the energy characteristics of a solar dryer, taking into account the metrological properties of measuring instruments for thermal parameters. The main focus is placed on determining the influence of heat carrier parameters, solar radiation intensity, and heat exchange efficiency on the energy performance of the system.

An analysis of measurement accuracy for temperature, humidity, and air velocity was carried out using thermocouple sensors, which made it possible to establish their metrological characteristics and evaluate measurement errors under real operating conditions. The proposed methodology provides a comprehensive evaluation, optimization of the operating modes of the solar dryer, and improvement of the reliability of experimental data. The obtained results can be applied to improve the design of solar drying units and to develop control systems for thermal parameters in renewable energy technologies. The methodology integrates experimental and analytical approaches to assess the dynamics of heat transfer and energy conversion processes within the solar drying chamber.

It also provides a basis for evaluating the influence of environmental factors on the efficiency of solar energy utilization. The systematic approach proposed in this work allows for establishing correlations between measured thermal parameters and the overall performance indicators of the system. This ensures not only accurate energy analysis but also supports further research in the development of intelligent monitoring and control systems for solar-powered thermal technologies. The obtained results contribute to improving the accuracy of experimental measurements, the reliability of energy audits, and the practical applicability of solar dryers.

**Keywords:** solar energy, solar dryer, temperature-humidity fields, heat and mass transfer, intensification, convective drying.