



DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-2-7

УДК 631.364:621.311.243

С. В. Коробка¹, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-4717-509X

І. Г. Стукалець¹, к.т.н.

ORCID 0000-0001-7107-4865

М. І. Бабич¹, к.т.н.

ORCID 0000-0003-1295-4162

С. М. Баранович¹, к.т.н.

ORCID 0000-0001-8671-6517

О. Г. Скляр², к.т.н.

ORCID 0000-0002-0456-2479

Б. В. Болтянський², к.т.н.

ORCID 0000-0003-2072-4025

Р. В. Скляр², к.т.н.

ORCID 0000-0002-1547-5100

¹ Львівський національний університет природокористування² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: korobkasv@ukr.net, тел.: +380989699534

ВПРОВАДЖЕННЯ ГЕЛІОСУШАРОК ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВИСУШЕНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПРОДУКТІВ

Анотація. У роботі детально представлено процес сушіння яблук у геліосушарці. Описано розробку нової конструкції сонячної сушильної установки, виготовленої з доступних матеріалів для сушіння сільськогосподарської продукції з ефективним використанням відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної, з урахуванням екологічних та економічних умов України. 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. Розроблено режими роботи геліосушарки з дзеркальним концентратором, тепловим акумулятором і додатковим осушувачем теплоносія, а також враховано циклічність процесу сушіння. Визначено кінетичні параметри вологовіддачі яблук, які відображають часові зміни кінетики їх сушіння.

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

Постановка проблеми. Сьогодні організація технологічних процесів сушіння в малих об'ємах в умовах *фермерських та приватних господарствах* часто здійснюється за допомогою енергоємних сушильних установок, що використовують традиційні види енергії, а саме електроенергію. Збереження паливно-енергетичних ресурсів є пріоритетним завданням для будь-якої держави, особливо в умовах

© С. В. Коробка, І. Г. Стукалець, М. І. Бабич, С. М. Баранович, О. Г. Скляр, Б. В. Болтянський, Р. В. Скляр, 2024



енергетичної кризи під час війни та нестабільного графіка електропостачання від НЕК «Укренерго» в окремих територіальних громадах. В багатьох сільськогосподарських регіонах України, зокрема для зони Західного Полісся (м. Корець, Рівненського району, Рівненської області) існують сприятливі умови для впровадження сушильних пристроїв на базі відновлюваних джерел енергії, що працюють від сонячної енергії. Тому, що використання сонячної енергії для сушіння фруктів є доцільним для географічної широти Рівненської області, де середньорічна потужність сонячного випромінювання становить приблизно $3,41 \text{ кВт}\cdot\text{год./м}^2$ протягом світлового дня, що дає змогу отримувати від $1,5$ до $2,3 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$ енергії з кожного квадратного метра площі повітряного колектора за добу. Крім цього, це особливо актуально, оскільки період дозрівання багатьох сільськогосподарських культур збігається з періодом інтенсивної сонячної радіації. Тому, використання сонячної енергії в поєднанні з іншими джерелами енергії може значно скоротити споживання паливно-енергетичних ресурсів. Отже, обґрунтування оптимального режиму роботи геліосушарки є важливим завданням, яке лежить в основі вдосконалення технології та обладнання для сушіння фруктів [1-3].

Аналіз останніх досліджень. Сушіння – це теплофізичний процес, що має на меті видалення вологи з продуктів при збереженні їхніх корисних властивостей, вітамінів, ароматичних й смакових якостей.

Сьогодні існує безліч автоматизованих установок для сушіння фруктів, які працюють при високих температурах [4]. Однак їх використання стає економічно не вигідним для невеликих обсягів обробки свіжих фруктів у приватних і фермерських господарствах через роботу установок на електричній енергії.

В працях [5,6] досліджували сушіння фруктів на відкритому повітрі, яке переважає у багатьох індивідуальних господарствах, відбувається під природним освітленням і потребує значних трудових затрат, що знижує його продуктивність. Крім того, в сезон дощів цей метод стає малоефективним.

У роботі [7] досліджено технологічні аспекти якісного сушіння фруктів, енергетичну і матеріаломісткість різних методів та технічних засобів, а також перспективи використання геліосушарок у цій технології. Зазначені методи сушіння мають такі недоліки: тривалий процес, значні витрати ручної праці та висока вартість висушених фруктів.

Цікавим є дослідження процесу сушіння фруктів конвективним методом, проведене автором роботи [8, 9], яке зосереджене на розробці



сушильної установки безперервної дії з примусовим дискретним переміщенням матеріалу під час сушіння.

Серед недоліків цієї установки можна виділити значне використання ручної праці та великі витрати тепла на обігрів конструктивних елементів сушильної камери.

Аналіз сучасних методів і засобів сушіння фруктів показав, що в особистих селянських і фермерських господарствах найпоширенішими є сушильні апарати камерного типу з конвективним підігрівом. Встановлено, що ці апарати не відповідають нормам енергоспоживання, мають низький термічний ККД та високу матеріаломісткість.

Ці результати дозволили визначити основні напрямки підвищення технологічної та енергетичної ефективності процесу сушіння за допомогою сонячної енергії. Відсутність на ринку аналогічних сушильних апаратів вказує на необхідність розробки конструкції геліосушарки з оптимальними технологічними параметрами, яка буде підходити для використання в особистих селянських і малих фермерських господарствах. Таким чином, ці міркування стали основою для вибору теми і роботи, а також її мети та завдань дослідження для даної статті.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою даного дослідження є підвищення ефективності технологічного процесу сушіння фруктів шляхом створення конструкції та обґрунтування режимів роботи геліосушарки, що сприятиме зменшенню витрат енергоресурсів.

Відповідно до поставленої мети необхідно було виконати такі завдання:

1. Дослідження та розробка нової конструкції сонячної сушильної установки з доступних матеріалів для сушіння сільськогосподарських продуктів;

2. Ефективне використання відновлюваних джерел енергії (сонячної енергії) з урахуванням екологічних та економічних характеристик України;

3. Виробництво сушених продуктів високої якості (без використання консервантів, барвників і ароматизаторів);

4. Сушіння сільськогосподарської продукції в геліосушарці та природне сушіння на відкритому повітрі з метою порівняння швидкості сушіння продуктів і якості висушеної продукції.

Основна частина. Основою для підвищення ефективності процесу сушіння фруктів рекомендується використовувати геліотермічні установки. Сьогодні існують багато різноманітних варіантів винаходів



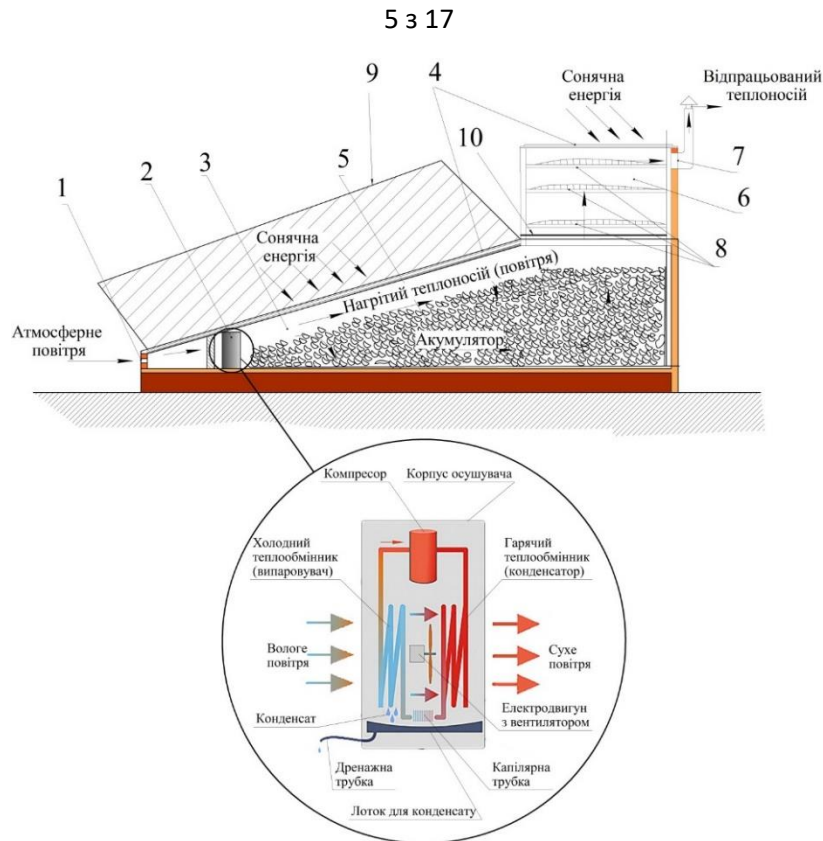
колекторів сонячної енергії різної складності. Крім цього, накопичено значний досвід сушіння фруктів і овочів за допомогою сонячної енергії.

Однак існуючі технології збору сонячної енергії ще не є достатньо ефективними, а конструкції колекторів залишаються громіздкими, дорогими та з низьким ККД. Відомі дослідження конструкцій геліосушарок і питань сушіння сировини [4-6]. Для подальшого розвитку досліджень у цій галузі було розроблено та сконструйовано геліосушильну установку – конвективного типу, а також проведено випробування із різними покриттями (поліетилен, скло, полікарбонат тощо).

У верхній частині геліосушарки (рис. 1) встановлено витяжну трубу, яка підсилює конвекцію, тоді як у нижній частині передбачено отвір для подачі свіжого повітря. Робочий режим визначається розмірами вентиляційної труби, яка регулює інтенсивність повітрообміну. Різниця у висоті між нижнім повітряним входом і верхнім кінцем труби становить приблизно 1,2-1,5 м, що сприяє покращенню конвекції завдяки різниці температур і тисків. Корпус конвективної геліосушарки, а також нижня частина великогабаритної установки пофарбовані в чорний колір для підвищення теплового ефекту. Всередині камер встановлені піддони з сітчастими решітками для завантаження сушеної продукції. Сировина поміщається в сушарки, які розміщуються на сонці, і нагріте повітря, що циркулює всередині, забезпечує високу швидкість і якість сушіння.

Сонячна енергія поглинається безпосередньо чорними стінками сушильної камери, де розміщується всередині висушуваний матеріал. Оскільки сушарка знизу має вентиляційний отвір з примусовою подачею теплоносія через волого осушувач та твердий акумулятор, а зверху з'єднана з вертикальною трубою, то всередині створюється повітряна тяга. Циркуляція повітря відбувається завдяки штучно циклічній природній тязі, що дозволяє випаруваній волозі виходити з теплоносієм в навколишнє середовище. Коли швидкість вітру на виході з труби збільшується, тиск у цій зоні знижується. Вищий тиск всередині корпусу фактично «виштовхує» повітря з сушарки в витяжний канал труби через заслінку.

Посилена конвекція повітря, поєднана з нагріванням, робить процес сушіння ефективним. Запропонована конструкція геліосушарки є комбінованою типу геліотермічної установки. У вітряну погоду, коли сушена продукція не може залишатися на відкритому повітрі через погіршення погодних умов сильний вітер або дощі її можна перемістити під навіс і в таких апаратах сушіння відбувається не менш інтенсивно, ніж у спеку, якщо повернути геліосушарку вхідним отвором у бік руху вітру то буде відбуватися висока швидкість сушіння [10-16].

*a**б*

1 – входний канал; 2 – волого осушувач теплоносія; 3 – повітропровід; 4 – повітряний колектор; 5 – тепло-акумулюючий матеріал (ТАМ); 6 – сушильна камера; 7 – витяжний канал; 8 – решета; 9 – плоский дзеркальний концентратор; 10 – заслінка

Рис. 1. Конструктивно-технологічна схема геліосушарки з тепловим акумулятором (*a*) та плоский дзеркальний концентратор і загальний вигляд дослідної установки (*б*):



Це пояснюється посиленням конвективного руху: вітер створює ефект вентилятора, як біля входу геліосушарки, так і на виході з витяжного каналу або навпаки за допомогою штучної циркуляції теплоносія через волого осушувач та твердий акумулятор.

Отже, розроблена геліосушарка вимагає проведення натурних випробувань, під час яких необхідно вибрати ефективні методи контролю енергетичних перетворень та масообмінних процесів, враховуючи змінність погодних умов і волого виділення висушуваного матеріалу.

Під час процесу сушіння параметри навколишнього середовища варіювалися в таких межах: температура повітря (T_{nc}) становила 16-30°C; відносна вологість повітря (φ_{nc}) коливалася від 26 до 86,8%; енергетична освітленість (E) змінювалася в межах 100-800 Вт/м². Теплотехнічні параметри теплоносія (повітря), що надходили в сушильну камеру, мали такі значення: температура теплоносія вдень (з 8:00 до 21:00) (T_{mn}) становила 20-60°C, а вночі (з 22:00 до 7:00) – 30-20°C; швидкість циркуляції теплоносія (v_{mn}) коливалася від 1 до 3 м/с; відносна вологість теплоносія (φ_{mn}) змінювалася в межах 9,8-86%. Теплопродуктивність повітряного колектора (Q) становила від 117 до 480 Вт при площі поглинальної поверхні (S_{nk}) 1,5 м². Температура акумулятора (T_{ma}) вдень (з 8:00 до 21:00) складала 30,5-45,6°C, а вночі (з 22:00 до 7:00) – 45,6-20,9°C.

Під час випробувань геліосушарки та дослідження процесу сушіння використовували яблука сорту «Семеренка», груші сорту «Столовка» і «Кюре», що мали початкову вологість $W_n = 70,3-85,2\%$. Плоди були нарізані кружечками товщиною 5-11 мм, а разове завантаження в геліосушарку становило $m_\phi = 5,5$ кг.

Для визначення вологості фруктів застосовують відносні величини – вологість та вологовміст, які розраховуються відносно довільної маси матеріалу, а не одиниці об'єму, як це має місце в газах.

Вологість матеріалу визначається, як відношення маси води (пари) в матеріалі, кг, до маси всього вологого матеріалу:

$$w = \frac{m_{\text{вол}}}{m}, \text{ кг/кг}; d = \frac{m_{\text{вол}}}{m}, \text{ г/кг}, \text{ або } W = \frac{m_{\text{вол}}}{m} \cdot 100\%, \text{ \%}; \quad (1)$$

Вологовміст матеріалу визначається, як відношення маси води в матеріалі, кг, до маси сухого матеріалу:

$$u = \frac{m_{\text{вол}}}{m - m_{\text{вол}}} \text{ або } U = \frac{m_{\text{вол}}}{m - m_{\text{вол}}} \cdot 100\%, \text{ кг вол./кг с. реч.}, \quad (2)$$

З огляду на наведені співвідношення, зв'язок між вологістю та вологовмістом можна виразити наступними рівняннями:



$$w = \frac{u}{u+1} \text{ або } u = \frac{w}{1-w}, \text{ кг вол./кг с. реч.} \quad (3)$$

Рівноважною вологістю вважається така, що забезпечує рівність тисків насиченої пари на поверхні матеріалу та в атмосфері навколишнього повітря.

Початкова вологість всіх свіжо нарізаних яблук і груш становить $W_n=80,2\%$. Оскільки фрукти закладаються в сушарку після попереднього бланшування, початкова вологість при закладці в різних експериментах може варіюватися, але не перевищує 5%. Маса закладки визначалася як різниця між показниками зважування повних решіт G_n і порожніх G_0 : $m=G_n-G_0$. Зменшення маси продукту протягом першої години та наступних періодів оцінюється, як різниця вагових показників:

$$\left. \begin{aligned} \Delta m_1 &= G_n - G_1 \\ \Delta m_2 &= G_1 - G_2 \\ \Delta m_n &= G_{n-1} - G_n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

На основі результатів поточного зважування зручніше обчислювати вологовміст, а не вологість, оскільки при порівнянні двох послідовних значень немає необхідності приводити їх до спільного знаменника. Наприклад, вологовміст у початковій вологості $W_n = 80,2\%$ ($w_0 = 0,802$):

$$u_0 = \frac{w_0}{1-w_0} = \frac{0,802}{1-0,802} = 4,051 \text{ кг вол./кг с. реч.}$$

Для закладки з початковою масою $m_0 = 5,5$ кг маса води $m_{\text{вол}}$ та маса сухої речовини (маса сухих фруктів) m_c відповідно становлять.

$$m_{\text{вол}} = w \cdot m_0 = 0,802 \cdot 5,5 = 4,411 \text{ кг}; \quad m_c = \frac{m_{\text{вол}}}{u} = \frac{4,411}{4,051} = 1,089 \text{ кг.}$$

Поточний вологовміст U розраховується за формулою:

$$U_1 = u_0 - \frac{G_0 - G_1}{m_c}, \text{ кг вол./кг с. реч.}, \quad (5)$$

де G_0 і G_1 – відповідно початкова і кінцева маса решіт з фруктами, кг.

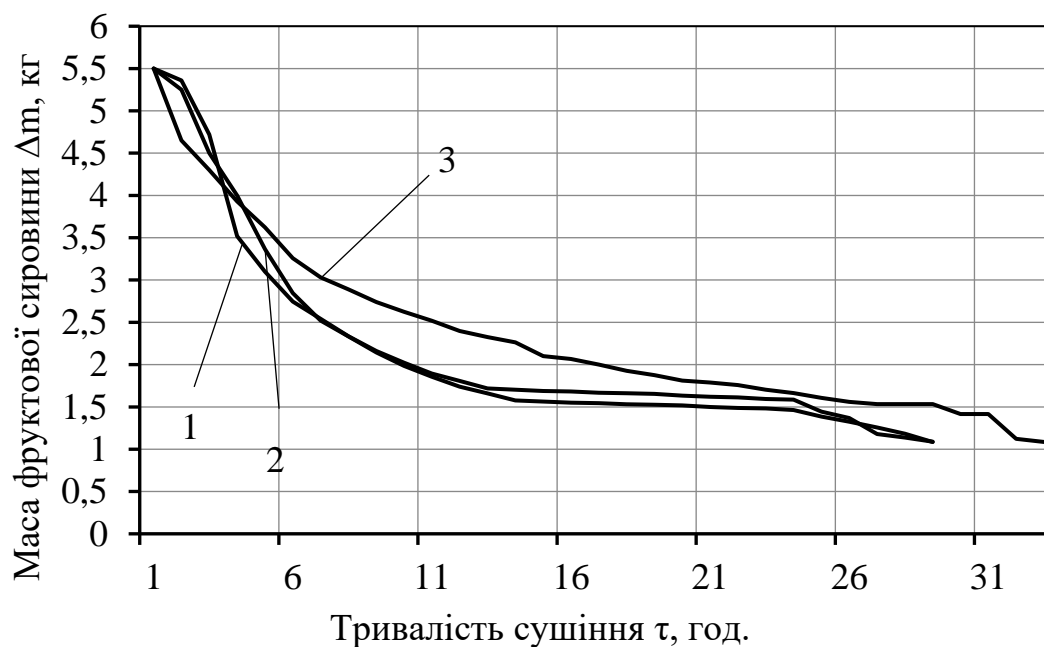
Проводимо сушіння яблук у геліосушарці та такої ж кількості яблук на відкритому повітрі. Зважуємо сировину кожні 2 години (з 10:00 до 20:00) та вимірюємо відносну вологість повітря, швидкість вітру, атмосферний тиск, а також температуру повітря в тіні і на сонці. Для наочності створюємо таблиці 1 і 2 та будуємо графік змін маси сировини щогодини, як для геліосушарки, так і для природного сушіння на сонці протягом дня. Результати експериментів наведені на рис. 2 і 3.



Таблиця 1

Дані для сушіння продукту яблука сорту «Семеренка» (1 день сушіння)

Година доби (год.)	Відносна вологість повітря (%)	Атмосферний тиск (кПа)	Швидкість вітру (км/год.)	Температура повітря в тіні (°C)	Температура повітря на сонці (°C)
10.00	64	102.1	4	19	25
12.00	50	102.1	7	21	26
14.00	24	102.0	9	24	27
16.00	44	101.8	10	23	27.5
18.00	44	101.8	7	25	25.2
20.00	44	101.8	7	24	24



1 і 2 – зміна маси сировини, що висушується в геліосушарці; 3 – зміна маси сировини, що висушується на відкритому повітрі

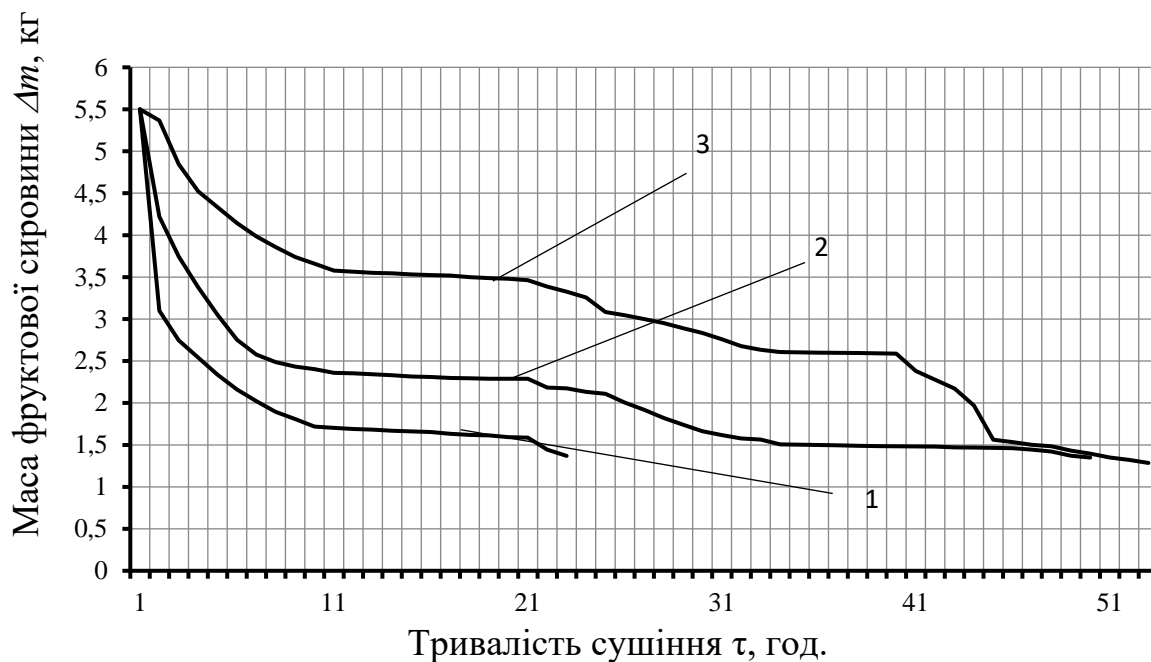
Рис. 2. Зміна маси сировини яблука сорту «Семеренка» протягом дня



Таблиця 2

Дані для сушіння продукту яблука сорту «Семеренка» (2 день сушіння)

Година доби (год.)	Відносна вологість повітря (%)	Атмосферний тиск (кПа)	Швидкість вітру (км/год.)	Температура повітря в тіні (°C)	Температура повітря на сонці (°C)	Примітка
10.00	67	101.8	4	19	24	Впродовж дня була мінлива хмарність
12.00	65	101.7	4	23	27	
14.00	62	101.7	4	26	29	
16.00	62	101.6	5	26	30	
18.00	60	101.0	5	19	24	
20.00	64	101.0	4	18	19	



1 і 2 – зміна маси сировини, що висушується в геліосушарці; 3 – зміна маси сировини, що висушується на відкритому повітрі

Рис. 3. Зміна маси сировини яблука сорту «Семеренка» протягом дня

Аналіз дослідних даних наведений у таблиці 3 та на рисунку 4.



Таблиця 3

Якісні показники висушених фруктів у геліосушарці

№ з/п	Спосіб сушіння	Вид матеріалу	Режим сушіння	Тривалість сушіння, год	Колір	Зовнішній вигляд	Смак	Оцінка за 5 бальною системою
1	Атмосферний спосіб сушіння	Семеренка. Початкова вологість 72,7%	Температура повітря 20 – 31,5°C	87	Світлий з коричневим відтінком	Розсипчаста маса фруктів	Приємний, солодкий	4,8
2	ГС без ТА	Семеренка. Початкова вологість 76,3%	Температура повітря 20 – 50°C	27	Світлий з коричневим відтінком	Розсипчаста маса фруктів	Приємний, солодкий	4,2
3	ГС без ТА	Столовка. Початкова вологість 77,1%	Температура повітря 20 – 50°C	27	Світлий з коричневим відтінком	Розсипчаста маса фруктів	Приємний, солодкий	4,5
4	ГС з ТА	Кюре. Початкова вологість 72,4%	Температура повітря 20 – 50°C	53	Світлий з коричневим відтінком	Розсипчаста маса фруктів	Приємний, солодкий	4,7
5	ГС з ТА	Кюре. Початкова вологість 72,9%	Температура повітря 20 – 50°C	51	Світлий з коричневим відтінком	Розсипчаста маса фруктів	Приємний, солодкий	4,8
6	ГС з ТА	Семеренка. Початкова вологість 74,5%	Температура повітря 20 – 50°C	27	Світлий з коричневим відтінком	Розсипчаста маса фруктів	Приємний, солодкий	4,7
7	ГС з ТА	Семеренка. Початкова вологість 76,3%	Температура повітря 20 – 63°C	33	Світлий з коричневим відтінком	Розсипчаста маса фруктів	Приємний, солодко-кислий	4,6



Яблука бланшовані у
соляному розчині
дольки 5 мм



Яблука бланшовані у
цукровому розчині
дольки 6 мм



Яблука без обробки
дольки 7 мм

Рис. 4. Зовнішній вигляд фруктів висушених у геліосушарці

Стандартні режими сушіння фруктів в геліосушарці регламентуються параметри сушильного агенту, що змінюється в процесі сушіння, та залежать від вологості сировини. Всі стандартні режими забезпечують бездефектне сушіння фруктів. Основними параметрами сушильного агенту, що характеризують режим сушіння, є, температура сушильного агенту T , ступінь насичення φ (відносна вологість повітря) і психрометрична різниця E .

Відносна вологість визначається відношенням парціального тиску пари p_n до тиску насичення p_n при даній температурі:

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n}, \%; \quad (6)$$

де p_n – парціальний тиск пари, Па;



p_n – тиск повітря насичений вологою, Па.

Психометрична різниця визначається з виразу:

$$E = T - T_M, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (7)$$

де T – температура сушильного агента, $^\circ\text{C}$;

T_M – температура змоченого термометра, психрометра $^\circ\text{C}$.

По температурному рівню режими діляться на чотири категорії: м'які М, нормальні Н, форсовані Ф і високотемпературні. Перші три категорії режимів (М, Н, Ф) відносяться до режимів низькотемпературного процесу. Як сушильний агент цієї групи режимів використовується вологе повітря або газоповітряну суміш температурою не вище $100\text{ }^\circ\text{C}$. Більш висока температура допускається лише в окремих випадках на останній стадії процесу. Високотемпературні режими, або режими високотемпературного процесу, передбачають сушіння нагрітим повітрям при температурі – 100°C . Категорія режиму вибирається залежно від висушеної продукції. При цьому слід враховувати характер дії температури на властивості сировини.

Під час сушіння м'якими режимами повністю зберігаються природні фізико-хімічні властивості сировини, зокрема поживні і цінні речовини (білки, вуглеводи, вітаміни).

Нормальні режими забезпечують збереження цінності сировини та можливість незначної зміни кольору. При сушінні форсованими режимами зменшується час сушіння сировини і 15-20% втрачаються вітаміни А і В₁. Аналогічно діє на сировину і високотемпературний режим сушіння.

У геліосушарках застосовують режими низькотемпературного процесу сушіння сировини. Для пароповітряних камер можна використовувати режими всіх категорій, а в камерах, що діють на перегріте повітря – тільки високотемпературні.

Режими низькотемпературного процесу сушіння наведені в таблиці 4, яка містить 44 режими, позначених по рівню температури порядковими номерами від 1 до 10 і по рівню ступеня насичення – буквеними індексами від А до Д. Параметри сушильного агента (повітря) вданій таблиці, характеризують його стан, при вході на нерухомий шар сировини.



Таблиця 4

Режими низькотемпературного процесу сушіння фруктів геліосушарці

Індекс режиму	Волога сировини, %	Номер режиму і параметри (t, E, φ) сушильного агенту																																
		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	—	—	—	—	—	—	—	—	—			



Висновки. 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 експериментів, 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.

Відомо, що втрати вітамінів обернено пропорційні тривалості сушіння. У цій статті представлені результати сушіння яблук, які демонструють, що тривалість сушіння яблук у геліосушарці в 3,4 рази менша, ніж при сушінні на свіжому повітрі. Продукти, висушені в геліосушарці, мають такі переваги:

1. покращені смакові властивості;
2. збережений вітамінний склад (підтверджено лабораторними аналізами);

Таблиця 5

Результати хімічного аналізу фруктової сировини до сушіння

Плоди	Вітамін С, мг/%	Цукристість, %	Кислотність, %	Сухі речовини, %	Нітрати, мг/100 г
Груші	10,2	17,236	0,53	14,50	13,980
Яблука	9,6	16,9	0,56	13,23	14,289

Таблиця 6

Результати хімічного аналізу фруктової сировини після сушіння

Плоди	Вітамін С, мг/%	Цукристість, %	Кислотність, %	Сухі речовини, %	Нітрати, мг/100 г
Груші	5,2	59,36	0,29	87,5	83,6
Яблука	4,3	57,8	0,46	85,9	85,7

3. триваліший термін зберігання без потреби у додаванні ароматизаторів і консервантів, а також без необхідності бланшування (оскільки під час бланшування через високі температури руйнується частина вітамінів).

Запропонована геліосушарка має кілька переваг у порівнянні з іншими відомими конструкціями:

- проста у виготовленні, її легко виготовити та відремонтувати з використанням доступних місцевих матеріалів;
- зручна в експлуатації;
- відносно недорога порівняно з іншими типами сонячних сушарок;



- високоефективна;
- економічна у використанні;
- забезпечує збереження якісних характеристик висушеної продукції.

Процес сушіння в геліосушарці забезпечує стерильність продукції. Під час сушіння сільськогосподарської продукції сировина залишається в апараті на кілька годин або діб, залежно від типу продукту, без необхідності:

- контролювати процес сушіння (немає потреби перевертати продукт);

- стежити за чистотою сировини, оскільки геліосушарка закрита, і продукт захищений від забруднення пилом, дощових опадів, дії роси, а також від птахів і комах, які в разі потрапляння в сушарку гинуть через високу температуру;

- враховувати погодні умови, оскільки сушіння триває навіть у дощ чи вітряну погоду, коли продукцію, що сушиться на відкритому повітрі, зазвичай доводиться переміщати в закриті приміщення.

Геліосушарку можна розмістити на будь-якому майданчику, орієнтованому на південь, щоб максимально використовувати сонячну енергію. Чим вища температура повітря, тим більше різниця температур між повітрям у геліосушарці та навколишнім середовищем. Конвективна геліосушарка є легкою та зручною для транспортування і її можна переміщувати або повертати за напрямком сонця протягом дня. Великогабаритний варіант геліосушарки переважно призначений для селянських господарств. Проста у виготовленні, ця сушарка може знайти застосування, як у фермерських так і в приватних господарствах.

Список використаних джерел

1. 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.

2. Pathare, P. V. Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Biosystems Engineering*. 2006. N. 93 P. 285 – 291.

3. Goyal, R. K., Kingsly A. R. P., 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.

4. Garau, M. C. Drying of orange skin: drying kinetics modeling and functional properties. *Journal of Food Engineering*. 2006. N. 75 P. 288 – 295.



5. Menges, H. O. Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. *Energy Conversion and Management*. 2006. N. 47 P. 2337 – 2348.

6. 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.

7. 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.

8. Midilli, A., Kucuk H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*. 2003. N. 44(7) P. 1111 – 1122.

9. Wang, Z. J. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Journal of Food Engineering*. 2006. N. 40. P. 39 – 46.

10. 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.

11. 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.

12. Korobka, S., Syrotyuk, S., Zhuravel, D., Boltianskyi, B., Boltianska, L. Solar dryer with integrated energy Unit. *Problems of the Regional Energetics*, 2021, (2). 60–75.

13. 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.

14. Дереза О.О., Болтянський Б.В., Дереза С.В. Використання VR-технологій в наукових дослідженнях. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В.М. Кюрчев*. Мелітополь. ТДАТУ, 2022. Вип. 12. том 2. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-2-28.

15. Болтянська Л.О., Болтянський Б.В. Альтернативні напрями енергозбереження в домогосподарствах населення. *XII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Ефективність функціонування сільськогосподарських підприємств»*. *Проблематика*



2023: «Функціонування сільськогосподарських підприємств на засадах циркулярної економіки»: матеріали міжнар. наук.-практ. інтернет-конференції. ЛНУП, Дубляни, 6-7 червня 2023 р. За ред. проф. Г.В. Черевка. Львів: Галицька видавнича спілка. 2023. С. 26-30.

16. Болтянський Б.В. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві: підручник / Б. В. Болтянський та ін. К.: Видавничий дім «Кондор», 2020. 410 с.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2024 р.

**S. Korobka¹, I. Stukalets¹, M. Babych¹, S. Baranovych¹,
O. Skliar², B. Boltianskyi², R. Skliar²**

¹Lviv National Environmental University

²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

IMPLEMENTATION OF SOLAR DRYERS FOR THE PRODUCTION OF DRIED AGRICULTURAL PRODUCTS

Summary

The paper presents in detail the process of drying apples in a solar dryer. The development of a new design of a solar drying plant made of available materials for drying agricultural products with efficient use of renewable energy sources, in particular solar energy, taking into account the ecological and economic conditions of Ukraine, is described. A new solar dryer design for drying agricultural raw materials has been developed. In this plant, different types of agricultural products can be dried using different materials to cover the drying chamber, such as polycarbonate, glass, polyethylene, corrugated metal (for drying herbs), etc. The modes of operation of the solar dryer with a mirror concentrator, a heat accumulator and an additional coolant dryer have been developed, and the cyclic nature of the drying process has also been taken into account. The kinetic parameters of the moisture release of apples were determined, which reflect the temporal changes in the kinetics of their drying.

As a result of conducting experiments during which more than 20 types of agricultural products were dried, it was established that the increased air temperature in the solar dryer significantly reduces the drying time, speeding up the process by 2.5-4.5 times compared to traditional drying in the sun.

It is known that the loss of vitamins is inversely proportional to the duration of drying. This article presents the results of drying apples, which demonstrate that the duration of drying apples in a solar dryer is 3.4 times less than when drying in the fresh air.

The solar dryer can be placed on any south-facing site to make the most of solar energy. The higher the air temperature, the greater the temperature difference between the air in the solar dryer and the surrounding environment. The convective solar dryer is light and easy to transport and can be moved or rotated in the direction of the sun during the day. The large-sized version of the solar dryer is mainly intended for peasant farms. Easy to manufacture, this dryer can be used both in farms and in private households.

Key words: solar energy, solar dryer, temperature and humidity fields, heat and mass transfer, intensification, convective drying