

Розділ 3 ЕНЕРГЕТИКА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

УДК 631.364:621.311.243

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИВАЛОСТІ СУШІННЯ ФРУКТІВ У ГЕЛІОСУШАРЦІ

**Віталій Боярчук, к. т. н., Сергій Коробка, к. т. н.,
Михайло Бабич, к. т. н., Роман Кригуль, к. т. н.**
*Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: korobkasv@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.043>

Боярчук В., Коробка С., Бабич М., Кригуль Р. Методика дослідження тривалості сушіння фруктів у геліосушарці

У статті наведено методику планування багатофакторного експерименту для визначення основних показників тривалості процесу сушіння в геліосушарці: швидкості сушіння, критичної вологості фруктів, коефіцієнта сушіння. На основі аналізу існуючих рівнянь розрахунку тривалості процесу конвективного сушіння було вдосконалено рівняння О. В. Ликова (4) для умов геліосушарки. В основі цього рівняння подано спрощений механізм тепло- і масообміну, який описано диференціальним рівнянням тепломасоперенесення.

Отримано рівняння регресії, за допомогою яких можна розрахувати залежності швидкості сушіння, критичної вологості фруктів, коефіцієнта сушіння в області зміни параметрів теплоносія: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$.

Встановлена кількість необхідних експериментів для нашого випадку 3^3 . Розроблено матрицю планування експерименту та отримано результати експерименту для лінійних функцій: швидкості сушіння, критичної вологості, коефіцієнта сушіння відносно значень досліджуваних факторів: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$.

Розроблено математичну модель дисперсійного аналізу технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці. Розраховано й перевірено оцінку адекватності моделі за критеріями Фішера та Стьюдента.

Обґрунтовано оптимальні режими роботи геліосушарки в області: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$. Виконано опис впливу конструктивних параметрів (площі колектора $S_{пк} = 1,5 \text{ м}^2$ і маси теплового акумулятора $m_{та} = 50 \text{ кг}$) на закономірності зміни теплотехнічних параметрів навколишнього середовища (температури навколишнього середовища $T_{нс.ср.} - 16 - 32 \text{ }^\circ\text{C}$, рівня сонячної активності $I_{нср.} - 100 - 824 \text{ Вт/м}^2$) і на тривалість процесу сушіння фруктів за таких параметрів: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$.

Ключові слова: геліосушарка, критерій оптимізації, сушіння фруктів, тепловий акумулятор.

Boiarchuk V., Korobka S., Babych M., Krygul R. Method of research of fruit drying duration in the solar dryer

The article describes the method of planning a multifactorial experiment to determine the main indicators of the duration of the drying process in a solar dryer: speed of drying, critical moisture of fruits, coefficient of drying.

Having analyzed the existing equations for calculating of the duration of the convective drying process, the O. Lykov equation (4) for the conditions of a solar dryer was improved. The equation is base on a simplified mechanism of heat and mass exchange, which is described by the differential equation of heat and mass transfer.

The article presents the obtained regression equation, which can be used to calculate dependence of the drying rate, critical humidity of the fruit, drying coefficient within the area of changing of coolant parameters: $10 \text{ W/m}^2 \leq Q \leq 460 \text{ W/m}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{hc} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ m/s} \leq v_{hc} \leq 2,5 \text{ m/s}$.

The number of experiments, required for our case, was determined as 3^3 . The experimental design matrix was developed and the experimental results were obtained for linear functions: drying rate, critical humidity, drying factor referring to the values of the studied factors: $10 \text{ W/m}^2 \leq Q \leq 460 \text{ W/m}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{hc} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ m/s} \leq v_{hc} \leq 2,5 \text{ m/s}$.

The work develops a mathematical model of dispersion analysis of the technological process of fruit drying in a solar dryer. The model adequacy is estimated and verifies according to Fisher and Student criteria.

The research substantiates optimum operating modes of the solar dryer in the region: $10 \text{ W/m}^2 \leq Q \leq 460 \text{ W/m}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{hc} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ m/s} \leq v_{hc} \leq 2,5 \text{ m/s}$. The work describes influence of design parameters (collector area $S_{hc} = 1,5 \text{ м}^2$ and mass of thermal accumulator $m_{ha} = 50 \text{ кг}$) on the regularities of change of thermal technical parameters of the

environment (ambient temperature $T_h = 16 - 32$ °C, the level of solar activity $I_n = 100 - 824$ W/m²) and duration of the fruit drying process according to the following parameters: $10 \text{ W/m}^2 \leq Q \leq 460 \text{ W/m}^2$; $20 \text{ °C} \leq T_{hc} \leq 50 \text{ °C}$; $1 \text{ m/s} \leq v_{hc} \leq 2,5 \text{ m/s}$.
Key words: solar dryer, optimization criterion, fruit drying, heat accumulator.

Постановка проблеми. Конвективне сушіння фруктів – це складний тепломасообмінний процес. Для його дослідження необхідно визначити теплофізичні, фізико-механічні, хімічні та інші властивості фруктів як об'єкта сушіння. Крім цього, необхідно вибрати та обґрунтувати режими процесу з подальшим створенням раціональних конструкцій енергоощадних сушильних установок. Розробка нових і вдосконалення існуючих технологій і техніки сушіння регламентуються як інтенсивностями тепловологообміну між джерелом (генератором) тепла та об'єктом сушіння, так і інтенсивностями тепло-, масоперенесення всередині висушуваного матеріалу. Тому цілеспрямований пошук способів інтенсифікації процесу конвективного сушіння повинен передбачити створення нових прогресивних технологій. Також важливою є розробка універсальних методів синтезу та аналізу залежностей тепломасообмінних характеристик і тривалості процесу сушіння від теплофізичних властивостей фруктів та фізичних параметрів навколишнього середовища.

Отримані раніше принципово важливі результати досліджень вчених не повністю відображають складну кінетику й динаміку тепломасообмінних процесів наведених вище об'єктів. Зокрема, у цих дослідженнях не враховано тривалості процесу сушіння, зміни фізичних параметрів навколишнього середовища, теплофізичних параметрів висушуваних фруктів та їх взаємозв'язку зі самими тепломасообмінними процесами. Тому розробка методики дослідження сушіння фруктів у геліосушарці, яка б враховувала означені проблеми, з подальшим удосконаленням технології та техніки сушіння є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виконаний аналіз чинних методик дослідження тривалості технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці свідчить про належне їх опрацювання.

Спочатку розглянемо детальніше особливості процесу конвективного сушіння, запропоновані О. В. Ликовим [5]. У процесі сушіння потік повітря зі сталою вхідною температурою і вологістю вологовмістом продукту зменшується за нелінійною залежністю. При малих швидкостях сушіння на відповідних часових залежностях виділяють три стадії процесу: підігріву, сталої та

спадної швидкості [5; 6]. Модель тристадійного процесу сушіння відповідає кінетиці масоперенесення в структурованих біологічних тканинах і зручна для планування параметрів сушарки. Для інженерних розрахунків важливо мати наближені співвідношення між середнім вологовмістом W і тривалістю сушіння τ , а також прості формули для розрахунку теплового балансу й витрати теплоносія. Стадія сталої швидкості сушіння ($N = \text{const}$) триває до стану критичної вологості W_k :

$$N = \frac{dW}{d\tau} = \frac{W_0 - W_k}{\tau}, \%/\text{с або } \%/\text{год.} \quad (1)$$

Процес сушіння фруктів у геліосушарці характеризується зміною вологості висушуваного матеріалу в часі. Про швидкість сушіння можна судити за кількістю вологи, випаруваної з висушуваного матеріалу за період часу, $\%/\text{с або } \%/\text{год}$.

Натомість стадію спадної швидкості сушіння прийнято описувати таким диференціальним рівнянням:

$$-\frac{dW}{d\tau} = K \cdot (W - W_p), \quad (2)$$

де K – коефіцієнт пропорційності (сушіння), який визначають графічним методом з експериментальної кривої сушіння, побудованої у напівлогарифмічних координатах. Типовим розв'язком цього рівняння є експоненційна залежність. Тому загальну тривалість сушіння прийнято оцінювати сумою двох часових інтервалів сталої та спадної швидкості, а саме:

$$\tau = \frac{W_0 - W_p}{N} - \frac{1}{\chi N} \cdot [1 + \ln \chi \cdot (W - W_p)], \quad (3)$$

де $\chi \approx 1,8/W_p$ – відносний коефіцієнт сушіння.

Відтак для оцінки загальної тривалості сушіння потрібно попередньо задати такі три параметри: W_0 , W_p – початковий і кінцевий (рівноважний) вологовміст та N – швидкість вологовиділення. Останній параметр визначають експериментально при заданих параметрах потоку агента сушіння та висушуваного матеріалу, але з великою суб'єктивною похибкою. Тому на практиці параметри сушіння оцінюють за результатами дослідження стандартизованих (модельних) матеріалів при заданих температурах і швидкостях потоку повітря.

За результатами обробки численних експериментальних кривих сушіння встановлено, що добуток $N \cdot \tau$ при заданій вологості матеріалу є сталою величиною. Тому за наявності однієї

кривої сушіння можливо розрахувати криву для будь-якого іншого режиму. Наприклад, розрахунок параметрів сушіння можна провести за результатами досліджень, наведених у спеціалізованій літературі [1; 2] з іншою метою.

Однак описана методика є дуже загальною і не відповідає сучасним досягненням теорії конвективного сушіння, а саме тепло-, масоперенесенню й тепломасообміну. Зокрема, результати дослідження поглиблення зони випаровування вологи з фруктів описують критерієм швидкості сушіння. На поверхні фруктової сировини волога, як залишок після миття, існує тільки на стадії прогрівання. Решту часу рідка фаза є багатокомпонентним розчином органічних та мінеральних речовин, а не вільною рідиною, як у класичних дисперсних матеріалах неорганічного походження. Тому під час розрахунку тривалості сушіння фруктів межу між критерієм швидкості сушіння та процесу видалення вологи провести неможливо.

У науковій праці [15] встановлено низку важливих закономірностей, які відбуваються за певної тривалості процесу сушіння фруктів, що пов'язані з визначенням напружень, котрі виникають усередині висушуваного матеріалу під час сушіння. Але, як показав аналіз виконаних досліджень, запропоновані в них методи розрахунку не завжди дають змогу визначити їх дійсну величину й розрахувати раціональні параметри сушильного агента. У праці [15] під час розв'язання цієї задачі було запропоновано використовувати диференціальне рівняння розрахунку тривалості сушіння О. В. Ликова, що відображає модель тристадійного процесу сушіння лише на першому етапі, а всі інші етапи сушіння ним не брались до уваги.

У праці [13] обґрунтовано технологічні параметри геліосушарки тунельного типу для сушіння плодів і овочів. Зокрема, запропоновано інженерні науково-методичні засади розрахунку тривалості сушіння фруктів, що ґрунтуються на методиці розрахунку тривалості сушіння в інфрачервоних сушарках. Однак автори нехтують розрахунком тривалості процесу сушіння фруктів у геліосушарці, що залежить від конструктивних параметрів (площі повітряного колектора, маси теплоакumuлюючого матеріалу), теплотехнічних параметрів навколишнього середовища, які пов'язані з рівнем сонячної активності за один цикл сушіння. Запропонована методика не може бути використана, тому що в ній відсутня конкретизація (оцінка) складових теплотехнічних параметрів теплоносія й технологічних параметрів

швидкості і тривалості процесу сушіння за умов комбінованого впливу сонячних променів і теплового акумулятора.

Автори у роботі [11] виконують аналіз сушильних установок з використанням сонячної енергії та обґрунтовують конструктивно-технологічні параметри. Розрахунки зводяться до вирівнювання й стабілізації режиму сушіння під час мінливої освітленості за рахунок резервного електронагрівача та тривалості процесу сушіння фруктів. Таку можливість оперативної зміни одночасно двох параметрів теплоносія – температури і швидкості – у ранковий і вечірній час здійснювали за допомогою вмикання електронагрівача. Однак у запропонованій методиці під час розрахунку тривалості процесу сушіння фруктів у геліосушарці не брали до уваги залежності тривалості процесу від конструктивних параметрів нагрівального обладнання (площі повітряного колектора, маси теплоакumuлюючого матеріалу) для посилення інтенсифікації і скорочення тривалості процесу сушіння в ранковий і вечірній час замість вмикання електронагрівача.

Невирішеною частиною проблеми також є наближений розрахунок тривалості конвективного сушіння фруктів у геліосушарці, що не потребує тривалих дослідів і може використовуватись під час перехідної вологості, що відрізняється від кінцевої вологості висушуваного матеріалу за атмосферного сушіння відповідно до ДСТУ 3808.1-80, ДСТУ 7319-80 [14].

Таким чином, обґрунтування оптимальних режимів роботи геліосушарки із забезпеченням найбільшої ефективності процесу сушіння мінімальними енергетичними витратами є важливим завданням. Складність цього процесу зумовлена взаємозалежністю енергетичних, кінетичних, динамічних параметрів та перебігом тепломасообмінних процесів і високою мінливістю фізичних властивостей фруктів. Натомість залишаються малодослідженими питання інтенсифікації та підвищення ефективності процесу сушіння фруктів за рахунок використання сонячної енергії та сушарок, принцип роботи яких заснований на її використанні, та розрахунку тривалості процесу сушіння. Оскільки більшість розроблених конструкцій існуючих сушарок виконано для країн зі спекотним кліматом, а їхній принцип роботи та процес сушіння досліджено в лабораторних умовах або за допомогою імітаційних моделей під час комп'ютерного моделювання, тому відомі конструкції сушарок потребують модифікації й удосконалення з метою підвищення ефективності роботи в умовах помірною континентального

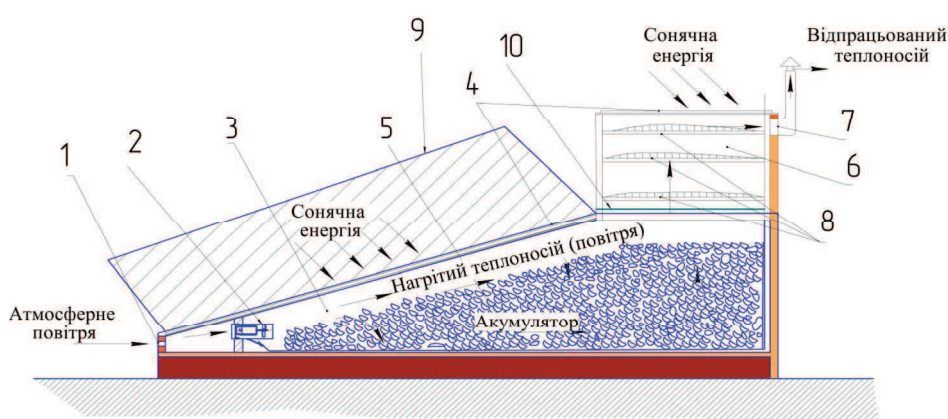
клімату Західного Полісся України (зокрема для м. Корця Рівненської області) та зменшення капітальних і експлуатаційних затрат.

Постановка завдання. Метою досліджень є проведення уточнювальних розрахунків тривалості конвективного сушіння фруктів у геліосушарці з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором.

Виклад основного матеріалу. Були проведені дослідження технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором, розроблений на кафедрі енергетики Львівського

національного аграрного університету. Ця установка є активною системою використання сонячної енергії (рис. 1), технічні характеристики подано в табл. 1 [14].

Геліосушарка працює таким чином. Решета 8 заповнюють нарізаними плодами та закладають у сушильну камеру. Повітря зі зовнішнього середовища надходить у повітропровід, під абсорбером, через шар теплоакумуючого матеріалу, нагрівається та потрапляє в сушильну камеру. Частина тепла акумулюється в тепловому акумуляторі. Відпрацьований теплоносій видаляється природною конвекцією в навколишнє середовище через витяжний канал.



a



б

Рис. 1. Геліосушарка з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором:
a – конструктивно-технологічна схема; *б* – загальний вигляд; 1 – вхідний канал;
 2 – вентилятор з нагрівачем; 3 – повітропровід; 4 – повітряний колектор;
 5 – теплоакумуючий матеріал (на основі гальки); 6 – сушильна камера; 7 – витяжний канал;
 8 – решета; 9 – плоский дзеркальний концентратор; 10 – заслінка

Fig. 1. Solar dryer with thermal battery and flat mirror concentrator:
a – design and technological scheme; *б* – general view; 1 – input channel;
 2 – fan with heater; 3 – air duct; 4 – air collector; 5 – heat accumulating material (pebble);
 6 – drying chamber; 7 – return channel; 8 – sieves; 9 – flat mirror concentrator; 10 – valve

Таблиця 1. Технічні характеристики геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором [14]**Table 1.** Technical characteristics of a solar dryer with thermal battery and flat mirror concentrator [14]

Параметр	Показник
Маса висушуваного матеріалу $m_{\text{ф}}$, кг	5,5
Площа повітряного колектора $S_{\text{пк}}$, м ²	1,5
Площа плоского дзеркального концентратора L , м ²	1,5
Маса теплового акумулятора $m_{\text{та}}$, кг	50
Внутрішній об'єм сушильної камери $V_{\text{вн.ск}}$, м ³	0,5

Перевагою сушарок такого типу є часткова залежність від сонячної активності. Це зумовлює її повну географічну орієнтацію та конструктивні характеристики, можливість застосування додаткового джерела електроенергії для живлення вентилятора і нагрівача, а також значну економію енергоресурсів у ранковий, вечірній і нічний час за рахунок використання плоского дзеркального концентратора і теплового акумулятора.

Методика підготовки фруктів до сушіння.

Дослідження проводили на фруктах трьох видів: яблука Семирічка, груші Столовка, Кюре, які найчастіше зустрічаються в особистих селянських господарствах, з початковою вологістю $W_n = 85,2 \div 70,3\%$. Маса однієї партії при разовому завантаженні в геліосушарку сирової фруктової сировини становить 5,5 кг [17].

Зміну вологовмісту фруктів залежно від обробки, розміру і форми нарізки матеріалу досліджували на лабораторній установці за умов:

1. Впливу способу бланшування на процес сушіння фруктів. Підготовка сировини: було проведено сортування, миття фруктів, нарізку кружальцями і дольками завтовшки $5 \div 11$ мм.

Нарізані фрукти бланшували трьома способами [17]:

- 1) бланшування в розчині цукру 3 хв (на 1 л води 10 г цукру);
- 2) бланшування в розчині солі 3 хв (на 1 л води 10 г солі);
- 3) без обробки.

2. Впливу товщини нарізки на процес сушіння фруктів.

Підготовка сировини: миття фруктів, нарізка кружальцями й дольками різної товщини [17]:

- 1 варіант – кружечки 5 мм;
- 2 варіант – кружечки 8 мм;
- 3 варіант – кружечки 11 мм;
- 4 варіант – дольки 5 мм;
- 5 варіант – дольки 6 мм;
- 6 варіант – дольки 7 мм. Сушіння в геліосушарці;

7 варіант – дольки 7 мм. Сушіння в шафі ВСП-50.

Після обробки фрукти уклали на решета й поміщали в сушильну камеру. У ході сушіння безперервно вимірювали вологість фруктів. Закінчення сушіння визначали зважуванням до постійної маси. Для кожного варіанта визначали тривалість сушіння фруктів у геліосушарці та порівнювали з теоретичною розрахунковою тривалістю процесу.

Таким чином, розроблена конструкція геліосушарки відповідає концепції активної сонячної енергетичної установки. Водночас суміщені в один блок повітряний колектор і тепловий акумулятор конструктивно не відповідають класичним зразкам сонячних теплових установок. Для розробленої установки теоретично не встановлені співвідношення між часовими залежностями тривалості конвективного сушіння і технологічними параметрами процесу. Наприклад, неможливо окремо провести випробування повітряного колектора і дзеркального концентратора за стандартною методикою або розрахувати динамічні властивості насипного теплового акумулятора чи дослідити тривалість процесу сушіння. Тому параметри, за якими оцінюють ефективність прийнятих рішень, встановлювали експериментально під час розрахунково-кількісних експериментальних досліджень тривалості сушіння фруктів у геліосушарці, а саме: джерело теплової енергії (повітряний колектор) – геліосушарка – акумулятор тепла – дзеркальний концентратор – середовище – об'єкт сушіння.

Отож, під час сушіння фруктів у геліосушарці впродовж доби спостерігається нерівномірна періодичність надходження потоку сонячної енергії. Тому температура теплоносія тут змінюється протягом доби залежно від погоди й пори року. У зв'язку з цим закономірності, що описують тривалість процесу сушіння, повинні відтворювати цю періодичність. Тому на основі аналізу існуючих рівнянь розрахунку тривалості

процесу конвективного сушіння для умов геліосушарки було вдосконалено рівняння О. В. Ликова (3) [5; 6], в основу якого покладено

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_{нас} = \frac{W_n - W_{кр.}}{N} + \frac{1}{K} \cdot \ln \left[\frac{W_{кр.} - W_p}{W_k - W_p} \right] + \frac{\Delta t \cdot c_{np} \cdot (T_{\phi 2} - T_{\phi 1}) + h_{шар} \cdot \rho_{np} \cdot (\sum S_{реш}) \cdot c_{np} \cdot (T_{mn3} - T_{mn2})}{S_{ск} \cdot v_{тн} \cdot \rho_{тн} \cdot c_{тн} \cdot (T_{mn2} - T_{mn1}) / \tau_{роб} - (S_{нк} \cdot E) - S_{зс} \cdot K \cdot (T_{кам} - T_{нс}) - V_{та} \cdot \rho_{та} \cdot c_{та} \cdot (T_{та2} - T_{та1}) / \tau_{роз}}, \quad (4)$$

де τ – тривалість сушіння фруктів, с; W_n – початкова вологість фруктів, яка визначається експериментально %; N – швидкість сушіння, що визначається за допомогою експериментів, %/с; K – коефіцієнт сушіння, що визначається експериментально, с; W_k – кінцева вологість фруктів, що визначається експериментально, %; $W_{кр.}$ – критична вологість фруктів у критичній точці процесу сушіння, що визначається експериментально, %; W_p – рівноважна вологість фруктів для заданого режиму сушіння, %; E – енергетична освітленість, Вт/м²; $S_{ск}$ – площа сушильної камери, м²; $\tau_{роб}$ – тривалість нагрівання сушильної камери, с; $v_{тн}$ – швидкість теплоносія, м/с; $\rho_{пр}$, $\rho_{тн}$, $\rho_{та}$ – густина відповідно фруктів, теплоносія і теплоакумулюючого матеріалу, кг/м³; $c_{тн}$, $c_{пр}$, $c_{та}$ – питома теплоємність відповідно теплоносія, фруктів і теплоакумулюючого матеріалу, Дж/(кг·°C); $h_{шар}$ – висота шару фруктового матеріалу на решетах, мм; $T_{та1}$, $T_{та2}$ – температура на вході теплового акумулятора і виході з нього, °C; $S_{реш}$ – площа решіт, м²; $S_{зс}$ – площа геліосушарки, м²; $T_{нс}$ – температура навколишнього середовища, °C; K – коефіцієнт теплопередачі через корпус геліосушарки, Вт/(м²·°C); $\tau_{роз}$ – тривалість розрядки теплового акумулятора, с.

Для визначення невідомих залежностей регресії швидкості сушіння, критичної вологості фруктів, коефіцієнта сушіння, під час розрахунку тривалості сушіння та обґрунтування параметрів теплоносія в геліосушарці можна використовувати метод лінійного планованого багатофакторного експерименту (БПЕ) [18]. Цей метод дозволяє забезпечити універсальність і можливість за наявності невеликого обсягу вхідної інформації провести дослідження й отримати достовірні результати та не має жорсткої регламентації стосовно застосування. Залежно від поставленої мети нами було вибрано тип експерименту, який буде покладено в основу методики планування, а саме вид графічної функції відгуку, способи оцінки отриманої інформації тощо [12].

Діючі фактори можуть бути вибрані за допомогою багатофакторного планованого експери-

спрощений механізм тепло- і масообміну, що описується диференціальним рівнянням тепло-масоперенесення:

менту. Фактори, які впливають, можуть бути обрані за допомогою спеціальних вибіркового експериментів або на основі багатофакторного експерименту. За результатами таких експериментів формується рівень варіювання факторів. Побудова матриці планування експерименту, математичної моделі й аналіз отриманих результатів мають формалізований характер і дають можливість прийняти та обґрунтувати низку конструктивних та технологічних рішень. Наприклад, поліпшення технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці [9].

Планування експерименту пов'язане з вивченням залежності критеріїв оптимізації від величини керуючих параметрів. Тому після постановки задачі загальний вигляд моделі об'єкта дослідження спрощується до такого: $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Загальну кількість дослідів N при багатофакторному плануванні експерименту визначають зі співвідношення

$$N = 2n^k, \quad (5)$$

де N – загальне число різних точок у плані; k – основне число факторів.

Оскільки фактори процесу сушіння неоднорідні і мають різні одиниці виміру, зводимо їх до єдиної системи обчислення за допомогою переходу від дійсних значень факторів до кодованих за формулою

$$x_i = \frac{z_i - z_{oi}}{\varepsilon}, \quad (6)$$

де x_i – кодоване значення фактору (безрозмірна величина); z_i і z_{oi} – натуральне значення фактору (відповідно його поточне значення та значення на нульовому рівні); ε – натуральне значення інтервалу варіювання фактору.

Рівняння математичних моделей БПЕ були отримані у закодованій формі. Тут під час заміни кодованих значень факторів абсолютних величин можна перейти від системи координат у натуральних одиницях до початкової системи в закодованій формі:

$$x_1 = \frac{Q - 256}{156}; x_2 = \frac{T_{mn} - 41,3}{29,3}; x_3 = \frac{\vartheta_{mn} - 1,8}{1,2}. \quad (7)$$

Якщо отримати рівняння регресії зі змінними в натуральному масштабі, необхідно підставити x_i за формулою кодування і зробити прості арифметичні перетворення в рівнянні, тоді математична модель набуває натурального вигляду.

Використовуючи рівняння (7), які пов'язують кодовані й іменовані значення факторів, під час розрахунку вибраної лінійної моделі рівнянь регресії будемо користуватися критерієм оптимізації:

$$y = b_0 + \sum_1^k b_i \cdot x_i + \sum_1^k b_{i \cdot j} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_1^k b_{i^2} \cdot x_i^2, \quad (8)$$

де y – параметр оптимізації; k – число факторів; b_0 – вільний член, рівний відгуку при $x^*=0$; b_j – оцінка коефіцієнта регресії, відповідного i -го фактору; $b_{i \cdot j}$ – оцінка коефіцієнта рівняння регресії, відповідної взаємодії факторів; x – кодоване значення факторів ($i = 1, 2, 3, \dots, n$).

Коефіцієнти регресії розраховують за методом найменших квадратів, використовуючи рівняння [1; 10]:

$$b_0 = c_1 \cdot \sum_1^n y_u - c_2 \cdot \sum_1^n \cdot + \sum_1^n x_{iu} \cdot y_u; \quad (9)$$

$$b_i = c_3 \cdot \sum_1^n x_{iu} \cdot y_u; \quad (10)$$

$$b_{ij} = c_4 \cdot \sum_1^n x_{iu} x_{ju} \cdot y_u; \quad (11)$$

$$b_{ii} = c_5 \sum_1^n x_{iu}^2 y_u - c_6 \sum_1^k + \sum_1^n x_{iu}^2 y_u - c_7 \sum_1^n \cdot y_u, \quad (12)$$

де $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7$ – коефіцієнти вибірки, значення яких наведені в табл. 2.

Для дослідження роботи геліосушарки в процесі сушіння фруктів основними факторами були вибрані: тепловий потік (x_1 , Вт/м²), температура теплоносія (x_2 , °C), швидкість теплоносія (x_3 , м/с).

Вихідними параметрами були вибрані: y_1 – швидкість сушіння, %/год; y_2 – критична вологість, %; y_3 – коефіцієнт сушіння, год.

У зв'язку з довготривалістю процесу сушіння фруктів у геліосушарці та хаотичною зміною фізичних параметрів навколишнього середовища (сонячної активності, температури та відносної вологості повітря), для полегшення розрахунків і сприйняття числових показників експериментальних досліджень тривалості технологічного процесу сушіння встановлювали у головній одиниці часу – секундах (с), а під час розрахунків переводили в позасистемні одиниці – години (год). Кореляцію адекватності результатів теоретичних і експериментальних досліджень для чистоти перевірки проводили у годинах.

Таблиця 2. Коефіцієнти вибірки

Table 2. Coefficients of sampling

K	П	Коефіцієнти вибірки						
		c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇
1	1	0,298	0,133	0,193	0,231	0,173	0,0156	0,112
2	3	0,156	0,025	0,089	0,145	0,069	0,0057	0,0472
3	3	0,129	0,012	0,042	0,089	0,041	0,0028	0,0259

Таблиця 3. Інтервали та рівні варіювання факторів

Table 3. Intervals and levels of factor variation

Рівень варіювання факторів	Фактори та їх позначення			Фактори в кодованому вигляді		
	теплопродуктивність повітряного колектора Q, Вт	температура теплоносія T _{тн} , °C	швидкість теплоносія v _{тн} , м/с	теплопродуктивність повітряного колектора x ₁ , Вт	температура теплоносія x ₂ , °C	швидкість теплоносія x ₃ , м/с
Нижній	0	20	1	-1	-1	-1
Верхній	460	60	3	+1	+1	+1
Основний	230	40	2	0	0	0
Інтервал варіювання	230	20	1	1	1	1

Таблиця 4. Матриця планування і результати експерименту

Table 4. The matrix of planning and experimental results

№ з/п	Кодовані значення факторів									y_1 , %/ГОД	y_2 , %	y_3 , ГОД	$y_{сep.}$	S
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2					
1	+1	-1	-1	+1	0	0	+1	+1	0	1,15	30,827	0,0505	10,87418	0,00232
2	+1	+1	-1	+1	0	0	+1	+1	0	3,05	30,654	0,0678	10,76503	0,874653
3	+1	-1	-1	-1	0	0	+1	+1	0	1,96	30,791	0,0788	10,87699	0,09301
4	+1	+1	-1	-1	0	0	+1	+1	0	2	31,25	0,0706	10,99503	0,43092
5	-1	-1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	3,63	30,44	0,0731	10,84118	-0,72513
6	-1	+1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	3,6	30,21	0,0805	10,68251	0,30173
7	-1	-1	+1	0	-1	0	+1	0	+1	1,78	32,85	0,05	11,70197	-0,83199
8	-1	+1	+1	0	-1	0	+1	0	+1	0,85	30,738	0,09798	10,109	0,177643
														$\Delta S_{сep.} = 0,040394$

Якщо врахувати, що рівнем фактору (x_i) називають певне його значення, яке буде фіксуватися під час проведення експерименту, тоді в нашому випадку нижнім і верхнім рівнями будуть три фактори, а саме: теплопродуктивність повітряного колектора – 10 і 460 Вт, температура теплоносія – 20 і 50 °С, швидкість теплоносія – 1 і 2,5 м/с. Рівні та інтервали варіювання перелічених факторів подано у табл. 3.

Оцінка області зміни обраних факторів проведена за результатами залежностей швидкості сушіння (N), критичної вологості ($W_{кр.}$), коефіцієнта сушіння (K), пов'язаних із рівнем сонячної активності та умовами навколишнього середовища. Тому для цього нами було поставлено таку область визначення факторів:

$$10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2;$$

$$20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{тн} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}; 1 \text{ м/с} \leq v_{тн} \leq 2,5 \text{ м/с}.$$

Для отримання математичної моделі технологічного процесу сушіння реалізований багатофакторний експеримент 3³. Складено матрицю планування експерименту для графічних функцій відгуку – швидкості сушіння, критичної вологості, коефіцієнта сушіння в області визначення факторів у кодованих значеннях, які наведені у табл. 4.

Експериментальні дані були оброблені на електронно-обчислювальній машині Acer FSPIRE E1-531 за допомогою програмного забезпечення Microsoft Office Excel 10 та Mathcad 15 з використанням методики латинських квадратів, що дає змогу отримати математичну модель планованого експерименту, обґрунтувати параметри і режими роботи геліосушарки за наведеними далі рівняннями [4; 7; 14]:

Математична модель з трьома змінними для у подається у загальному вигляді лінійної моделі рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (13)$$

Математична модель з трьома змінними для швидкості сушіння, критичної вологості та коефіцієнта сушіння розраховується аналогічно y , з урахуванням заміни y_n на натуральні фактори швидкості сушіння N , критичної вологості $W_{кр}$ та коефіцієнта сушіння K :

$$N = 1,249 + 0,162 \cdot Q + 0,293 \cdot T_{тн} + 0,104 \cdot v_{тн} + 0,002 \cdot Q \cdot T_{тн} - 0,029 \cdot Q \cdot v_{тн} + 0,035 \cdot T_{тн} \cdot v_{тн} - 0,017 \cdot Q^2 - 0,112 \cdot T_{тн}^2 - 0,002 \cdot v_{тн}^2. \quad (14)$$

Оцінка адекватності моделі: $F_{розр.} = 0,285$;

$F_{табл.} = 2,5$; $F_{розр.} < F_{табл.}$ – модель адекватна.

$$W_{кр} = 6,269 + 1,142 \cdot Q - 0,084 \cdot T_{тн} + 0,171 \cdot v_{тн} + 0,003 \cdot Q \cdot T_{тн} - 0,138 \cdot Q \cdot v_{тн} - 0,047 \cdot T_{тн} \cdot v_{тн} - 0,083 \cdot Q^2 - 0,142 \cdot T_{тн}^2 - 0,004 \cdot v_{тн}^2. \quad (15)$$

Оцінка адекватності моделі: $F_{розр.} = 0,888$;

$F_{табл.} = 2,5$; $F_{розр.} < F_{табл.}$ – модель адекватна.

$$K = 3,0489 + 0,095 \cdot Q + 0,130 \cdot T_{тн} + 0,050 \cdot v_{тн} + 0,006 \cdot Q \cdot T_{тн} + 0,109 \cdot Q \cdot v_{тн} + 0,073 \cdot T_{тн} \cdot v_{тн} - 0,026 \cdot Q^2 - 0,139 \cdot T_{тн}^2 - 0,003 \cdot v_{тн}^2. \quad (16)$$

Оцінка адекватності моделі: $F_{розр.} = 0,045$;

$F_{табл.} = 2,5$; $F_{розр.} < F_{табл.}$ – модель адекватна.

Програми оцінювали значущість коефіцієнтів за критерієм Стьюдента, а адекватність моделі – за критерієм Фішера [2; 3].

Середні значення показників параметрів оптимізації визначали за реалізацією паралельних спостережень за формулою

$$y_i = \frac{\sum_{j=1}^{m_n} y_{ij}}{m_n}, \quad (17)$$

де y_i – справжнє значення параметра оптимізації; y_{ij} – рядок плану матриці планування; m_n – число паралельних спостережень у кожній точці; j – порядковий номер паралельного дослідження в кожній точці плану матриці.

Середнє квадратичне відхилення дисперсійної похибки отриманого рівняння регресії визначали за формулою

$$S_0^2 = \sum_{i,j,k} x_{(i,j,k)}^2 \dots x_{(\dots)}^2 / N^2. \quad (18)$$

Оцінку дисперсійної адекватності моделі визначали за такою формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum b_i^*{}^2}{N-l}, \quad (19)$$

де N – число дослідів; l – число параметрів у рівнянні.

Довірчим інтервалом коефіцієнта регресії є:

$$|\Delta b_i| = T_{\alpha,n} \cdot S_{bi}, \quad (20)$$

де $T_{\alpha,n}$ – критерій Стюдента; n – число дослідів; S_{bi} – наближене значення похибки відтворюваності.

Оцінка значень коефіцієнтів регресії пов'язана з побудовою довірчих інтервалів, а саме коефіцієнт рівняння регресії значущий тоді, коли його абсолютна величина більша відносно довірчого інтервалу, тобто [4]:

$$|b_i| \geq |\Delta b_i|; \quad (21)$$

$$2,48 \geq 0,023.$$

Адекватність отриманої моделі процесу сушіння перевіряємо за критерієм Фішера F [8]:

$$F_i = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2}. \quad (22)$$

Табличне значення $F_{таб}$ прийmemo відповідно до отриманих цифрових показників – ступенів відповідності $f_{ad} = N - K'$ і $f_2 = (m - 1)$ за $Q=5\%$.

Розраховуємо статистичну похибку, отриману за критерієм Стюдента $f=(n-1)$ із степенями відповідності:

$$\sqrt{\lambda_c} = \sqrt{\frac{(\sum b_i^*)^2}{n} - \frac{(n-1)n}{S(n-1)}} = \frac{\sum b_i^*}{n} \cdot \sqrt{\frac{n}{3}};$$

$$\sqrt{\lambda_c} \frac{0,0846}{9} \cdot \frac{9}{0,00013875} = 2,39.$$

Тут середній залишок незначно відрізняється від нуля. Тому визначаємо оцінку дисперсійної похибки S_{ad}^2 за рівнянням

$$S_{ad}^2 = \frac{0,0012498}{8-3} = 0,0002083.$$

Перевіряємо адекватність отриманих рівнянь за критерієм Фішера F щодо рівня значущості 0,05:

$$f_{ad} = N - K' = 8 - 3 = 5;$$

$$f_2 = (m - 1) = 3 - 1 = 2;$$

$$F_{табл.} = 2,5;$$

$$F_i = \frac{S_{ad}^2}{S_{сп.кв.}} < 2,5; \quad (23)$$

$$F_1 = \frac{0,0002083}{0,00073} = 0,285 < 2,5;$$

Таблиця 5. Дисперсійний аналіз технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці

Table 5. Analysis of variance of the technological process of drying fruit in solar dryer

№ з/п	Фактор	Сума квадратів	Число степеня	Середній квадрат
1	Тепловий потік	$S_{bi}^2 = N^{-1} \sum_i x_i^2 \dots x_{(\dots)}^2 / N^2$	$n-1$	$S_1/n-1$
2	Температура теплоносія	$S_{b3}^2 = N^{-1} \sum_k x_k^2 \dots x_{(\dots)}^2 / N^2$	$n-1$	$S_3/n-1$
3	Швидкість теплоносія	$S_{b1}^2 = N^{-1} \sum_j x_j^2 \dots x_{(\dots)}^2 / N^2$	$n-1$	$S_2/n-1$
4	Всього	S_e – різниця	$(n-1)(n-2)$	$S/(n-1)(n-2)$

Таблиця 6. Результати дисперсійного аналізу

Table 6. Results of the analysis of variance

Показник мінливості	Сума квадратів	Число степеневих показників	Середній квадрат
Тепловий потік Q	0,00146	2	0,00073
Температура теплоносія T_{mn}	0,00925	2	0,004628
Швидкість теплоносія v_{mn}	0,00047	2	0,000235
S_e		0	
$S_{всього}$	0,0119693	8	0,001496

$$F_2 = \frac{0,0002083}{0,000235} = 0,886 < 2,5;$$

$$F_3 = \frac{0,0002083}{0,00462} = 0,045 < 2,5.$$

Для оптимізації теплотехнічних параметрів процесу сушіння був вибраний графічний метод з використанням лінійних функцій. Лінійні функції $y_{1...n} = f(x_{1...n}, x_{2...n}, x_{3...n})$ пропонуються для технологічного опису та вибору оптимальних числових значень, обґрунтування параметрів і режимів роботи геліосушарки залежно від теплового потоку (x_1), температури теплоносія (x_2) та швидкості теплоносія (x_3).

Для полегшення пояснення та інтерпретації результатів були використані кодовані значення факторів, які наведені у табл. 3.

Спосіб знаходження залежностей $y_{1...n} = f(x_{1...n}, x_{2...n}, x_{3...n})$ приймаємо у вигляді створення лінійних функцій $y = \sum_{i=1}^n f_i(C_i)$ відносно

значень досліджуваних факторів:

$$N = f(Q, T_{mn}, v_{mn});$$

$$W_{кр} = f(Q, T_{mn}, v_{mn});$$

$$K = f(Q, T_{mn}, v_{mn}).$$

В оцінці області багатофакторного експерименту обґрунтовано режими роботи геліосушарки:

$$10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2;$$

$$20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{тн} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}; 1 \text{ м/с} \leq v_{тн} \leq 2,5 \text{ м/с}.$$

На основі залежностей вихідних параметрів від кожного з трьох факторів побудовано графіки, які наведено на рис. 2 – 4.

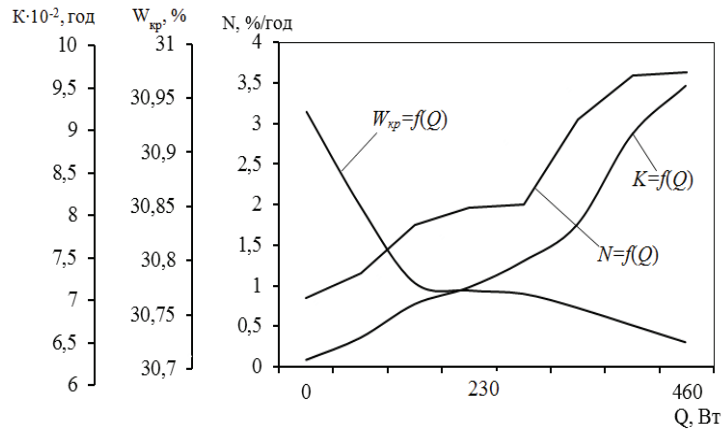


Рис. 2. Залежність коефіцієнта сушіння K , критичної вологості фруктів $W_{кр}$ і швидкості сушіння N від теплопродуктивності повітряного колектора Q

Fig. 2. Dependence of the drying coefficient K , critical humidity of fruit $W_{кр}$ and drying rate N on thermal productivity of air collector Q

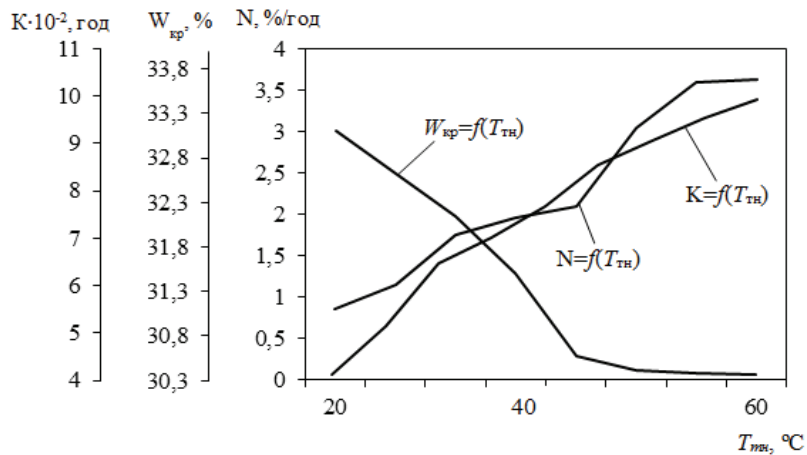


Рис. 3. Залежність коефіцієнта сушіння K , критичної вологості фруктів $W_{кр}$ і швидкості сушіння N фруктів від температури теплоносія T_{mn}

Fig. 3. Dependence of the drying coefficient K , critical humidity of fruit $W_{кр}$ and speed of drying N of fruit on the temperature of coolant T_{mn}

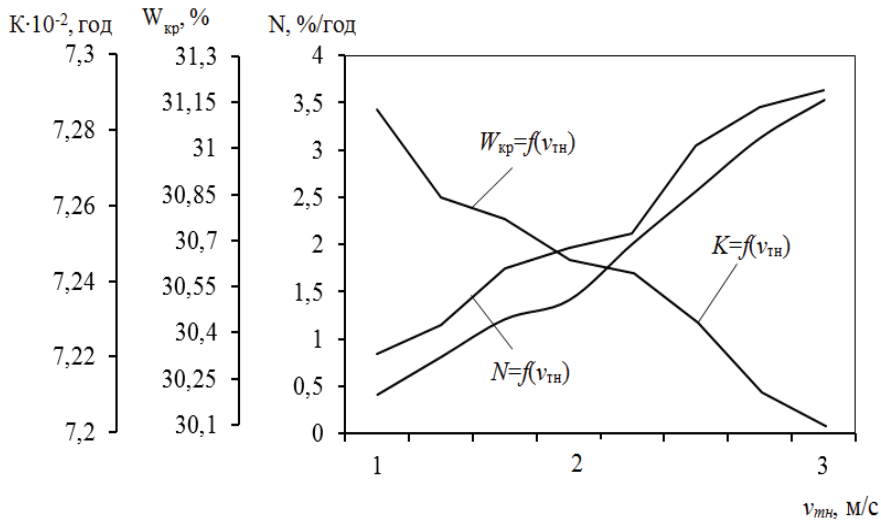


Рис. 4. Залежність коефіцієнта сушіння K , критичної вологості фруктів $W_{кр}$ і швидкості сушіння N від швидкості руху теплоносія $v_{тн}$

Fig. 4. Dependence of the drying coefficient K , critical humidity of fruit $W_{кр}$ and speed of drying N on the speed of movement of coolant $v_{тн}$

Таблиця 7. Результати розрахунково-кількісних експериментальних досліджень тривалості сушіння фруктів у геліосушарці

Table 7. Results of experimental studies of the duration of fruit drying in a solar dryer

№ досліду	T	τ_1 , год	τ_2 , год	$\tau_{наз.}$, год	N , %/год	$W_{кр.}$, %	K , год
1	87	1,8	84,17	1,03	1,15	30,827	0,0505
2	33	4,63	27,17	1,2	3,05	30,654	0,0678
3	51	3,57	46,41	1,02	1,96	30,791	0,0788
4	50	6,15	42,75	1,1	2	31,25	0,0706
5	27	2,11	23,88	1,01	3,63	30,44	0,0731
6	27	2,31	23,66	1,03	3,6	30,21	0,0805
7	54	2,13	50	1,05	1,78	32,85	0,05
8	118	2,96	114	1,04	0,85	30,738	0,09798

Таблиця 8. Зведені результати дослідження технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці в період 15.07–3.09.2019 р. [14; 16; 17]

Table 8. Integrated results of the study of the technological process of fruit drying in a solar dryer in the period from 15.07 to 3.09.2019 [14; 16; 17]

№ з/п	Тривалість сушіння, год	Тривалість інтервалу сушіння $\tau_{діб.}$, год (доба)	Конфігурація установки		Досліджувана сировина	$Q_{сон.}$, МДж	$Q_{пр.}$, МДж
			ТА *	ПДК **			
1	50	15–17.07	+	+	Яблука	108,5	47,6
2	119	15–21.07	–	–	Груші	–	0
3	74	28–31.07	–	–	Яблука	123,1	44,1
4	77	7–10.08	–	–	Яблука	110,5	39,6
5	50	10–12.08	+	+	Груші	74,8	26,8
6	50	15–17.08	+	+	Сливи	81,3	29,1
7	98	31–3.09	–	–	Сливи	95,8	35,7

Примітки: * – тепловий акумулятор; ** – плоский дзеркальний концентратор

Аналіз отриманих результатів (див. рис. 2 – 4) показує, що максимальні значення швидкості сушіння фруктів N (від 0,85 до 3,63 %/год) досягаються за теплопродуктивності повітряного колектора Q від 10 до 460 Вт, температури теплоносія $T_{\text{тн}}$ від 20 до 60 °С та швидкості циркуляції теплоносія $v_{\text{тн}}$ від 1 до 3 м/с. Критична вологість фруктів $W_{\text{кр}}$ при цьому знижується від 33,8 до 30,1 %, а коефіцієнт сушіння фруктів K збільшується від $5,05 \cdot 10^{-2}$ до $9,798 \cdot 10^{-2}$ год.

Результати дослідження показників сушіння: N – швидкість сушіння фруктів, %/год; $W_{\text{кр}}$ – критична вологість фруктів, %; K – коефіцієнт сушіння фруктів, год – дали змогу розрахувати тривалість процесу (див. табл. 7).

Отже, на основі планованого багатофакторного експерименту обґрунтовано режими сушіння фруктів у геліосушарці, які показують, що максимальні значення швидкості сушіння фруктів N (від 0,85 до 3,63 %/год) досягаються за теплопродуктивності повітряного колектора Q від 10 до 460 Вт, температури теплоносія $T_{\text{тн}}$ від 20 до 60 °С та швидкості циркуляції теплоносія $v_{\text{тн}}$ від 1 до 3 м/с. Критична вологість фруктів $W_{\text{кр}}$ при цьому знижується від 33,8 до 30,1 %, коефіцієнт сушіння фруктів K збільшується від $5,05 \cdot 10^{-2}$ до $9,798 \cdot 10^{-2}$ год, а тривалість сушіння становить $\tau = 27 \div 118$ год.

Таким чином, отримані залежності мають зростаючий або спадний характер, що відповідає фізичній сутності процесу сушіння фруктів у геліосушарці.

Крім того, натурні випробування геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором проводили в індивідуальному фермерському господарстві ФГ «Зоря», що розташоване у м. Корці Рівненської області (Україна), у літньо-осінній період з 16 липня до 9 жовтня 2019 р.

Детальний опис результатів дослідження технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці та аналіз впливу режимних параметрів на енергетичну ефективність установки з різною конфігурацією і тривалість процесу сушіння наведено в роботах [14; 16; 17]. Зокрема, дослідили процес роботи енергетичного блока геліосушарки з різною конфігурацією, а саме у комплекті з дзеркальним концентратором і тепловим акумулятором та без їхнього використання і в режимі природної циклічності. Результати виробничих випробувань геліосушарки зведено у табл. 8.

У період випробувань геліосушарки з 15.07.2019 р. до 17.07.2019 р. середньоденні фізичні параметри навколишнього середовища

були такими [16]:

1. Температура повітря $T_{\text{пс}} - 16...30$ °С.
2. Відносна вологість повітря $\varphi_{\text{пс}} - 26...86,8$ %.
3. Енергетична освітленість $E - 100...800$ Вт/м² для площі поглинальної поверхні $S_{\text{пк}} = 1,5$ м².
4. Теплотехнічні параметри теплоносія (повітря), що надходив до сушильної камери, становили: температура в денний час (з 8⁰⁰ до 21⁰⁰ год.) $T_{\text{тн}} - 20...60$ °С, у нічний час (з 22⁰⁰ до 7⁰⁰ год.) $T_{\text{тн}} - 30...20$ °С.
5. Швидкість циркуляції теплоносія (повітря) $v_{\text{тн}} - 1...3$ м/с.
6. Відносна вологість теплоносія (повітря) $\varphi_{\text{тн}} - 9,8...86$ %.
7. Температура акумулятора $T_{\text{та}}$ в денний час (з 8⁰⁰ до 21⁰⁰ год.) становила 30,5...45,6 °С, у нічний час (з 22⁰⁰ до 7⁰⁰ год.) – 45,6...20,9 °С.

В експериментальних дослідженнях температуру вимірювали у градусах Цельсія (°С), а під час розрахунків переводили в одиниці термодинамічної температури (К). Кореляцію адекватності результатів теоретичних і експериментальних досліджень для чистоти перевірки проводили у градусах Цельсія (°С).

Таким чином, структура розподілу сонячної енергії, що надходить на повітряний колектор, свідчить про те, що геліосушарка за один цикл сушіння використовувала сонячну енергію в межах від 100 до 800 Вт/м². Це дало змогу одержати теплову енергію в межах 55669,1 кДж, з якої теплоносієм поглинув 27856 кДж і затратив 23987 кДж на нагрівання та випаровування вологи з продукту. Надлишок теплової енергії було накопичено в акумуляторі в межах 2633,1 кДж.

На завершення, зазначимо, що основним недоліком геліосушарки є контроль за некерованими параметрами процесу сушіння, який зводиться до регулювання вологості та вологовмісту висушуваного матеріалу в бік зменшення їхніх значень, а також регулювання температури. Температура, вологість та вологовміст теплоносія у геліосушарці коливаються в досить широкому діапазоні залежно від погодних умов, часу доби, конфігурації енергетичного блока сушарки, інтенсивності сонячної енергії. Отож, тривалість сушіння фруктів не можна розрахувати або змодельовати за допомогою імітаційних моделей під час комп'ютерного моделювання, а необхідно процес сушіння фруктів у геліосушарці контролювати за кінетичними і динамічними параметрами процесу, а саме за зміною маси m , вологості W і вологовмісту U висушуваного матеріалу та отриманою якістю сировини (див. табл. 7 і 8). Оскільки неможливо контролювати хаотичні

фізичні параметри навколишнього середовища, то можна тільки підлаштуватися під них, а саме інтенсифікувати процес сушіння фруктів з використанням максимальної кількості сонячної енергії за допомогою об'єднання в єдиний енергетичний блок у геліосушарці повітряного колектора, теплового акумулятора, сушильної камери та плоского дзеркального концентратора.

Висновки

1. Застосування сонячної енергії для сушіння фруктів є прийнятним для широти розташування Рівненської області, яка має середньорічну потужність сонячного випромінювання порядку $3,41 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ за світловий день. Це дозволяє з 1 м^2 площі повітряного колектора отримати від $1,5$ до $2,3 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ енергії за добу.

2. Рівняння регресії в декодованому вигляді дає змогу розрахунковим способом проаналізувати процес сушіння фруктів у геліосушарці при обробці отриманих числових значень розглянутих факторів, а саме теплотехнічних та технологічних параметрів і режимів процесу сушіння фруктів у геліосушарці, що лежать у досліджуваній області експерименту: $10 \text{ Вт}/\text{м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{\text{тн}} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м}/\text{с} \leq v_{\text{тн}} \leq 2,5 \text{ м}/\text{с}$.

3. На основі планованого багатфакторного експерименту обґрунтовано режими сушіння фруктів у геліосушарці, зокрема максимальні значення швидкості сушіння фруктів N (від $0,85$ до $3,63 \text{ } \%/ \text{год}$) досягаються за теплопродуктивності повітряного колектора Q від 10 до 460 Вт , температури теплоносія $T_{\text{тн}}$ від 20 до $60 \text{ }^\circ\text{C}$ та швидкості циркуляції теплоносія $v_{\text{тн}}$ від 1 до $3 \text{ м}/\text{с}$. Критична вологість фруктів $W_{\text{кр}}$ при цьому знижується від $33,8$ до $30,1 \text{ } \%$, коефіцієнт сушіння фруктів K збільшується від $5,05 \cdot 10^{-2}$ до $9,798 \cdot 10^{-2} \text{ год}$, а тривалість сушіння τ становить $27 \dots 118$ годин.

4. На теплопродуктивність геліосушарки $Q = 117 \dots 480 \text{ Вт}$ суттєво впливає енергетична освітленість E^{max} , посилена дзеркальним концентратором, яка становить у ранковий період (з 7^{00} до 10^{00} год.) від 456 до $965 \text{ Вт}/\text{м}^2$ та вечірній період (з 17^{00} до 20^{00} год.) – від 734 до $223 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

5. Одержані результати можуть бути використані для розрахунку собівартості конвективного сушіння фруктів у геліосушарці. Перспективним напрямом подальших досліджень є оптимізація перехідної вологості висушуваного матеріалу під час конвективного сушіння фруктів у геліосушарці.

Бібліографічний список

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 274 с.
2. Бачурская Л. Д., Гуляев В. Н. Пищевые концентраты. Москва: Пищ. пром-сть, 1976. 335 с.
3. Веденяпин Г. В. Общая методика исследования и обработки опытных данных. Москва: Колос, 1973. 200 с.
4. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск: Изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 1982. 302 с.
5. Лыков А. В. Теория сушки. Москва: Энергия, 1968. 472 с.
6. Лыков А. В. Теплообмен: справочник. Москва: Энергия, 1970. 480 с.
7. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Ленинград: Колос, 1980. 258 с.
8. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Ленинград: Энергия, 1978. 262 с.
9. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. Москва: Наука, 1971. 378 с.
10. Финни Д. В. Введение в теорию оптимального эксперимента. Москва: Наука, 1970. 243 с.
11. Azimi A., Tavakoli T., Khademhosseini H. Experimental Study on Eggplant Drying by an Indirect Solar Dryer and Open Sun Drying. *Iranica Journal of Energy & Environment*. 2012. Vol. 3, issue 4. P. 347–353.
12. Experimental performance and modeling of a greenhouse solar dryer for drying macadamia nuts / S. Janjai, C. Phusampao, W. Nilnont, P. Pankaew. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2014. Vol. 5. P. 1155 – 1161.
13. Kaveh M., Amiri Chayjan R., Esna–Ashari M. Thermal and physical properties modelling of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under solar drying. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 61, issue 4. P. 150–161.
14. Korobka S., Babych M. Substantiation of the constructive–technological parameters of a solar fruit dryer. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, issue 8 (85). P. 13–19.
15. Modeling of the motion of free convective drying agent in plastic helio dryer / Z. M. Khazimov, G. C. Bora, K. M. Khazimov, M. Z. Khazimov. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2014. Vol. 23, issue 4. P. 306–315.
16. Results of research into technological process of fruit drying in the solar / S. Korobka, M. Babych, R. Krygul, A. Zdobytskyj. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 1/8(91) P. 64–73.
17. Substantiation of economic efficiency of using a solar dryer under conditions of personal peasant farms / M. Babych, S. Korobka, R. Skrynkovskyy, S. Korobka, R. Krygul. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6, issue 8 (84). P. 41–47.
18. Thin layer drying model for simulating the drying of Tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) in a solar tunnel dryer / G. M. Kituu et al. *Journal of Food Engineering*. 2010. Vol. 98, issue 3. P. 325 – 331.

Стаття надійшла 20.09.2019