

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА**

УДК 621.181.7

**ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ СИРОВИНИ В ПОБУТОВИХ СУШАРКАХ**

О. Ю. Співак, М. О. Кучинський

*Розроблена експериментальна установка для визначення основних параметрів процесу сушіння. Запропонована математична модель машинної обробки експериментальних даних кінетики процесу сушіння, яка дозволяє більш точно і раціонально вибирати значення параметрів тепловологісних режимів сушки, а також визначати їх значення для теплових розрахунків сушарок.*

*Разработана экспериментальная установка для определения основных параметров процесса сушки. Предложена математическая модель машинной обработки экспериментальных данных кинетики процесса сушки, которая позволяет более точно и рационально выбирать значения параметров тепловлажностных режимов сушки, а также определять их значение для тепловых расчетов сушилок.*

*An experimental setup for determining the basic parameters of the drying process. A mathematical model of the computer processing of experimental data of the kinetics of the drying process, which allows more accurate and efficient to choose the parameters of heat and humidity regimes of drying, as well as to determine their significance for the calculation of thermal dryers.*

**Вступ. Постановка проблеми**

Переважна більшість рослинних продуктів у свіжому вигляді містить в собі 80-90 % води. Така висока вологість та особливості біохімічного складу плодів, овочів та зелені обмежують термін зберігання цих продуктів до декількох годин чи діб.

Як показує досвід, жоден штучний набір синтетичних препаратів неспроможний повноцінно замінити природний набір біологічно-активних речовин, який міститься в натуральних продуктах. Тому одним із найважливіших завдань науки та переробної промисловості є розробка і впровадження технологій консервування і тривалого зберігання усього комплексу поживних та інших корисних властивостей плодів, овочів, ягід тощо.

У світовій практиці понад 80 % сушених овочів, фруктів та ягід виробляється у сушарках конвективного типу. Це обумовлюється їх простотою та доступністю. Проте для простих моделей конвективних сушарок є характерна велика енерговитратність та нестабільна (а здебільшого низька) якість виробленої в них суші [1]. Тому дослідження кінетики процесів сушіння, особливо експериментальні, є актуальними і дають підставу для розробки як нових конструкцій сушильної техніки, так і вдосконалення тепловологісних режимів процесів сушіння.

**Формулювання мети досліджень**

Метою даної роботи є експериментальне дослідження кінетики сушіння і впливу тепловологісного режиму на швидкість сушіння сільськогосподарської сировини та якість готового висушеного продукту.

**Експериментальна установка**

Базою для створення експериментальної установки є серійна універсальна побутова сушарка "Садочок-1" яка виготовляється ТОВ "Технопром" (м. Вінниця).

Для вимірювання вологості циркулюючого і відпрацьованого сушильного агента використовувалася аспіраційний психрометр марки АП-82. Для вимірювання температури використовувались чотири термоелектричні датчики (термопари) типу ХК(L). Як реєструючий прилад застосовувався електронний цифровий мікровольтметр типу Щ 300.

Індивідуальне градування кожної термопари проводили за реперними точками:

потрійною точкою води і температурою кипіння води. Швидкість відпрацьованого сушильного агента вимірювалася чашковим анемометром.

Схема експериментальної установки показана на рис. 1.

### Методика проведення експериментів

Як сировина використовували свіжі яблука з початковою вологістю  $W_0 = 86 \%$ . Підготовлена сировина зважувалася на лабораторній вазі ЛВ-50. Зважена сировина розподілялась на піддонах сушарки, які згідно з інструкцією з експлуатації сушарки вставлялися в робочу камеру, прогріту до  $65 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Температура в усіх контрольних точках (4 термопари і датчик сушарки) визначалась через кожні 15 хвилин, а швидкість відпрацьованого повітря – на початку і в кінці сушки. За цією швидкістю і діаметром вихідного отвору визначалась витрата відпрацьованого сушильного агента.

Кратність рециркуляції сушильного агента в камері визначалась за паспортними даними вбудованих вентиляторів SUNON DX-200. Відносна вологість відпрацьованого і свіжого повітря, що подавалось на сушіння, вимірювалася аспіраційним психрометром через кожні 15 хвилин разом із вимірюванням температури. Готовність висушеної продукції визначалась додатковою термопарою, гарячий спай якої був вставлений в шматочок сировини на піддоні.

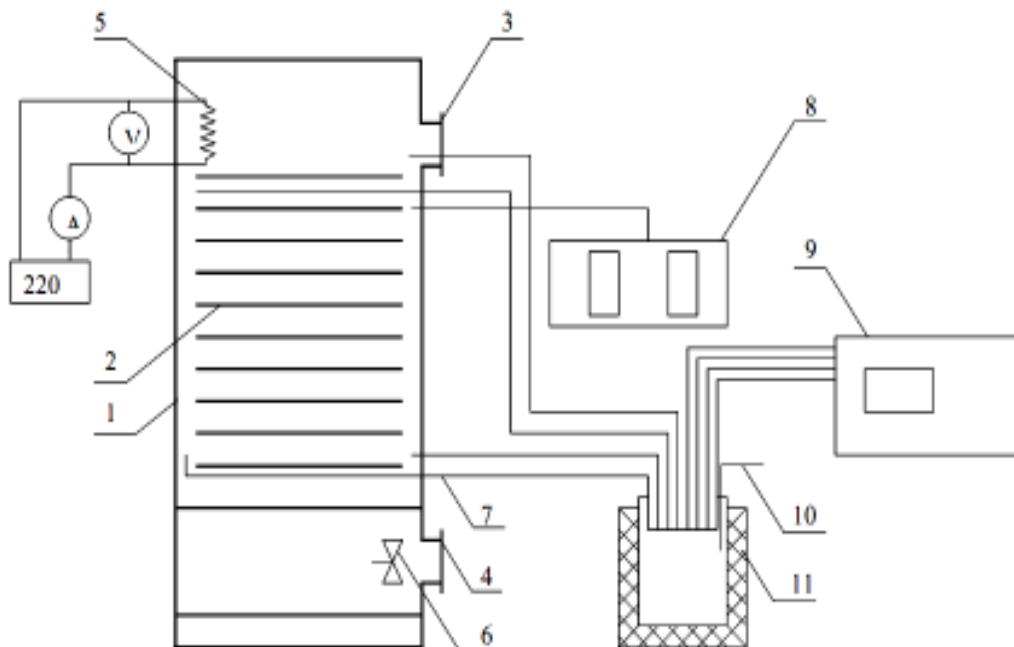


Рис. 1. Схема експериментальної установки

- |   |   |
|---|---|
| 1 – теплоізольована робоча камера;                  | 7 – термоелектричні датчики (термопари) типу ХК(L); |
| 2 – сітчасті піддони (10 шт.);                      | 8 – електронний термометр;                          |
| 3 – отвір, через який всмоктується сушильний агент; | 9 – електронний цифровий мікровольтметр типу Щ 300; |
| 4 – отвір, через який викидається сушильний агент;  | 10 – ртутний термометр;                             |
| 5 – трубчастий електронагрівник;                    | 11 – термостат.                                     |

### Результати експериментальних досліджень конвективного сушіння харчових продуктів та їх обробка

Між кількістю відведеної з матеріалу в процесі сушки вологи і вологовмістом сушильного агента (повітря), який виводиться з сушарки є певний зв'язок і ним можна скористатися для зміни визначення вологовмісту чи вологості матеріалу в процесі конвективного сушіння.

З рівняння теплового балансу теоретичної сушарки [2]:

$$G_n \cdot u_1 + L_0 d_0 = G_2 \cdot u_2 + L_2 d_2, \quad (1)$$

де  $d_0, d_2$  – вологовмісти сушильного агента на вході в робочу камеру сушарки і на виході з неї;

$G_n$  і  $G_2$  – маса матеріалу на початку і в кінці сушки;

$L_0$  і  $L_2$  – масова витрата повітря на вході в сушарку і на виході з неї.

Прийmemo до уваги, що переріз вихідного отвору сушарки і тиск в робочій камері сушарки є сталим, а вміст вологи в повітрі змінює його масову витрату незначно, тобто можна вважати, що  $L_0 = L_2 = L_\tau$ , де  $L_\tau$  – масова витрата повітря в будь-який момент часу. Тоді рівняння теплового балансу можна переписати так:

$$G_n \cdot u_1 - G_2 \cdot u_2 = L_\tau (d_2 - d_0). \quad (2)$$

Оскільки  $G_n \cdot u_1 - G_2 \cdot u_2 = W$  то  $W = L_\tau (d_2 - d_0)$ , а отже, кількість вологи, яка вивільняється в процесі сушки можна визначити, знаючи витрату повітря і вологовмісти вхідного і вихідного повітря, що однозначно визначаються за температурами сухого і мокрого термометра на вході і виході з сушарки [1].

Експериментальні дослідження процесів конвективного сушіння яблук пізніх сортів ( $W_0 = 86\%$ ) показані на рисунках.

На підставі експериментальних значень температур сухого і мокрого термометрів за допомогою таблиць властивостей вологого повітря визначені поточні значення вологовмісту повітря в процесі сушки. Графічна інтерпретація значень вологовмісту показана на рис. 2.

За допомогою ПЕОМ виконано машинний регресійний аналіз експериментальної кривої  $d = f(\tau)$ , в результаті якого експериментальні значення описані поліномом вигляду  $d = A\tau^n + B\tau^{n-1} + C\tau^{n-2} + \dots$

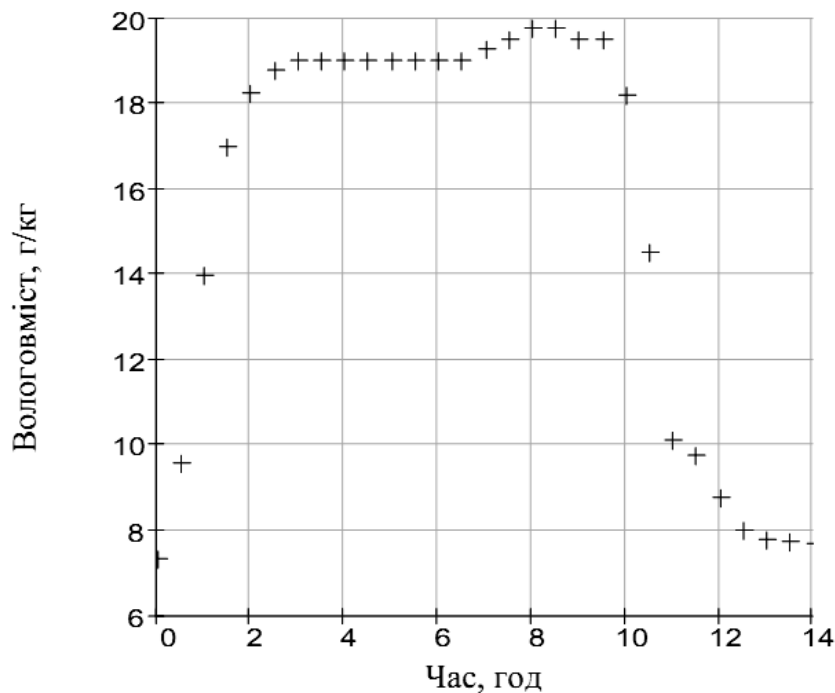


Рис. 2. Експериментальні дані зміни вологовмісту в процесі сушіння яблук з початковою вологістю 86 %.

Графічне зображення регресивної функції  $d = f_1(\tau)$  показано на рис. 3.

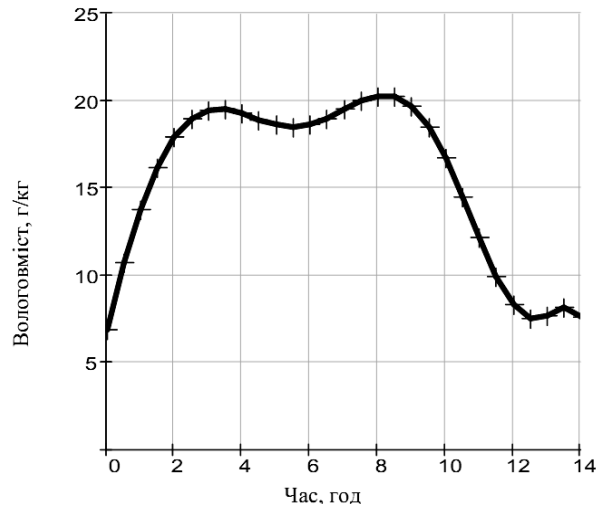


Рис. 3. Регресійна крива зміни вологовмісту для сушіння яблук

Оскільки вологість на суху масу визначається за формулою

$$W_C = (G_0 - G_C) / G_C \cdot 100\%, \quad (3)$$

де  $G_0$  – загальна маса сировини;

$G_C$  – маса абсолютно сухої речовини, то величина  $W_C$  може бути значно більша, ніж 100 % на відміну від вологості на загальну масу.

Виконано регресійний аналіз функції  $W_C = f(\tau)$ . Графічна інтерпретація полінома цієї функції показана на рис. 4.

На рис. 3 і 5 чітко видно три основні зони сушіння. Перша зона (ділянка OA) є зоною прогріву сировини і характеризується зростаючою швидкістю сушіння. Друга зона (ділянка АК) – зона з відносно сталою швидкістю сушіння, в якій температура сировини наближається до температури мокрого термометра, що відповідає умові адиабатного сушіння. Прогин кривої сушіння в другій зоні пояснюється тим, що до точки  $C_K$  випаровується вільна волога з поверхні висушуваного матеріалу. За точкою  $C_K$  крім вільної вологи випаровується осмотична волога з глибинних шарів прогрітого матеріалу [2, 3].

Точка  $B'$  відповідає рівноважній вологості матеріалу  $W_C^P$  (рис. 4), яка дорівнює вологості сушильного агента. В цій точці швидкість сушіння теоретично повинна дорівнювати нулю, але реальне сушіння триває до точки B.

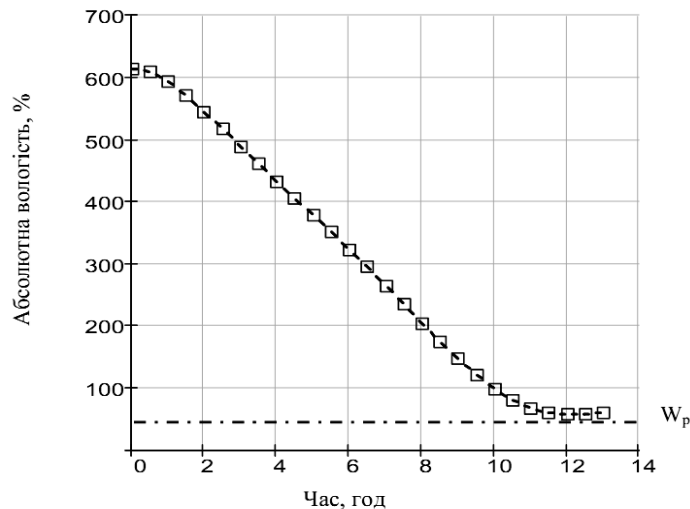


Рис. 4. Регресійна залежність зміни абсолютної вологості сировини на суху масу для сушіння яблук з  $W_0 = 86\%$

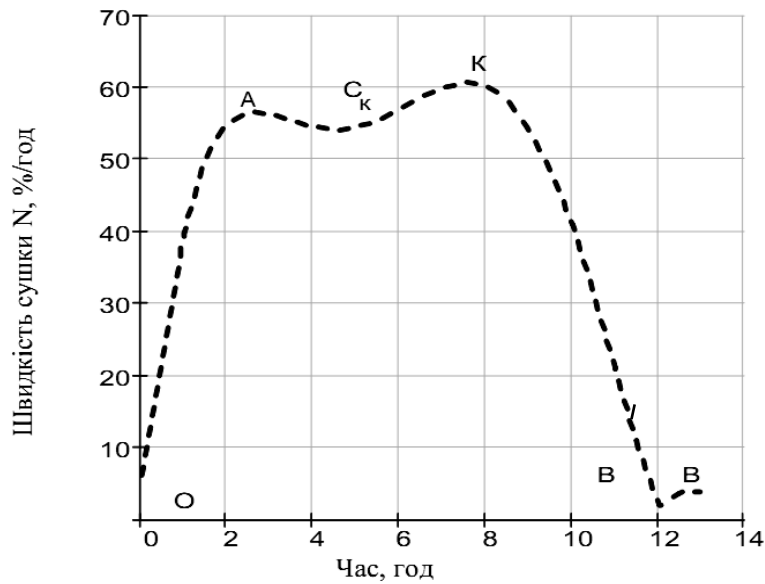


Рис. 5. Крива швидкості сушіння яблук з  $W_0 = 86 \%$

### Висновки

- Розроблена експериментальна установка дозволяє дослідним шляхом визначати основні параметри процесу сушіння і може бути використана як експериментальна база для дослідження кінетики процесу сушіння основних видів сільськогосподарської сировини.
- Запропонована математична модель машинної обробки експериментальних даних кінетики процесу сушіння та їх графічна інтерпретація за допомогою програми MathCAD і аналітичної апроксимації графічних залежностей дозволяє більш точно і раціонально вибирати значення параметрів тепловологісних режимів сушки, а також визначати їх значення для теплових розрахунків сушарок.

### Використана література

8. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М.: Пищевая пром-ть. – 1973. – 527 с.
9. Ткаченко С. Й. Сушильні процеси та установки / С. Й. Ткаченко, О. Ю. Співак. – Вінниця.: ВНТУ, 2008. – 98 с.
10. Кац З. А. Производство сушёных овощей, картофеля и фруктов / З. А. Кац. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность. – 1984. – 216 с.

**Співак Олександр Юрійович** – к.т.н., ст. викл. кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.

**Кучинський Максим Олексійович** – студент Вінницького національного технічного університету.