

## Моделирание кинетичните криви на сушене на кайсии

Донка Иванова, Николай Вълков, Валентин Стоянов, Ирена Вълкова

**Mathematical modelling of drying kinetics for apricots:** *Drying kinetic of apricot was investigated considering different drying conditions in this study. The drying experiments were performed at four levels of drying air temperatures of 50÷80°C, and four levels of air flow velocities of 0,5÷2m/s. Modified Page model was fitted to the experimental data. The effects of drying air flow rates and temperatures on the constants of the model were also studied. It was proved that the obtained mathematical model is adequate.*

**Key words:** apricot, drying, mathematical model

### ВЪВЕДЕНИЕ

Сушенето е типичен топло и масообменен процес, който намира широко приложение в земеделското стопанство. Този метод на консервиране на земеделска продукция е известен още в древността. От началото на 20<sup>-ти</sup> век започва интензивно развитие и научно изследване на принудителното сушене с използване на класически енергийни източници. Промислените сушилни имат висока производителност, осигуряват постоянни параметри на сушилния процес и добро качество на продукта, но се характеризират с високи енергийни разходи. Поради това са необходими изследвания за определяне на режимните параметри за конкретни плодове и зеленчуци, при които се постига намаляване на енергийните разходи и получаване на продукцията с високо качество.

Многообразието на факторите, влияещи върху кинетиката на сушилния процес, и тяхната взаимна връзка, затрудняват получаването на строги аналитични зависимости. Ето защо при описанието на сушилния процес обикновено се използват модели, обобщаващи многобройните опити. Направеният обзор на различни кинетични модели на сушилни процеси показва, че някои плодове и зеленчуци имат период на постоянна скорост на сушене и период с намаляваща скорост на сушене [1, 5], а други нямат период на постоянна скорост на сушене [2, 4]. Освен това, отчитайки че плодовете и зеленчуците се сушат в тънък слой, не е необходимо за оптималното управление на процеса да се търсят и локалните стойности на температурата и влагосъдържанието на материала. Следователно първата стъпка при оптимизация на сушилните процеси е да бъде получен адекватен модел на кинетиката на процеса за конкретния материал за сушене.

Целта на статията е да се изведе математичен модел, описващ изменението на влагосъдържанието на кайсии в хода на сушилния процес, в зависимост от температурата и скоростта на сушилния агент.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

Сушилните процеси бяха реализирани през юли 2011г. Експерименталната установка за снемане на кинетичните криви на сушене е показана на фиг.1. Състои се от камера с леси, вентилатор, нагреватели, персонален компютър, контролер, цифрова везна, датчици за относителна влажност и температура, и анемометър. По време на експериментите бяха записвани температурата и влажността на атмосферния въздух, и консумираната електрическа енергия, а контролирани температурата и скоростта на сушилния агент. По килограм, почистени от костилките, кайсии бяха нареждани върху лесите и бяха сушени до достигане на равновесно състояние. Експериментите бяха проведени при температури 50; 60; 70 и 80°C и скорости 0,5; 1; 1,5 и 2m/s на сушилния агент. По време на сушенето се измерваше масата на кайсиите през 15min, чрез електронна везна с клас на точност III. Началната влажност на кайсиите беше 86% и бяха сушени до достигане на състояние, при което нямаше по-нататъшна промяна на масата - до 16÷18% влажност.



Фиг.1 Експериментална установка за снемане на кинетичните криви на сушене

Влагоотделянето от плодовете и зеленчуците в процеса на сушене се описва с отношението на влагосъдържанията  $MR$  [2, 4], като

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

където  $M$  е влагосъдържанието в момента  $t$ , kg/kg;

$M_o$  – началното влагосъдържание, kg/kg;

$M_e$  – равновесното влагосъдържание, kg/kg.

В литературата са предложени различни модели, описващи кривата на сушене на различни плодове и зеленчуци, Табл.1 [2]. В настоящата статия е избран модифицираният модел на Пейдж

$$MR = \exp(-(p \cdot t)^q) \quad (2)$$

Определени са константата  $p$  и степенния показател  $q$  за различните експериментални криви на сушене, снети при различни температура и скорост на сушилния агент, Табл.2. Коефициентът на корелация между експерименталните и описващите по модела кривата на сушене данни е приведен в Табл.2.

Зависимостите, определящи константата на сушене  $p$  и степенния показател  $q$ , като функция на параметрите на сушилния агент са:

$$p = 1,5919 \cdot 10^{-5} + 6,9358 \cdot 10^{-5} \cdot \theta - \frac{0,0019}{v} + \frac{4,0082 \cdot 10^{-4}}{v^2}, \quad R = 0,9913 \quad (3)$$

$$q = -14,0559 \cdot v^2 \cdot \exp\left(\frac{-0,7372 \cdot v}{\theta}\right) + 1,8406 \cdot \exp\left(\frac{-13,8357}{\theta}\right), \quad R = 0,9487 \quad (4)$$

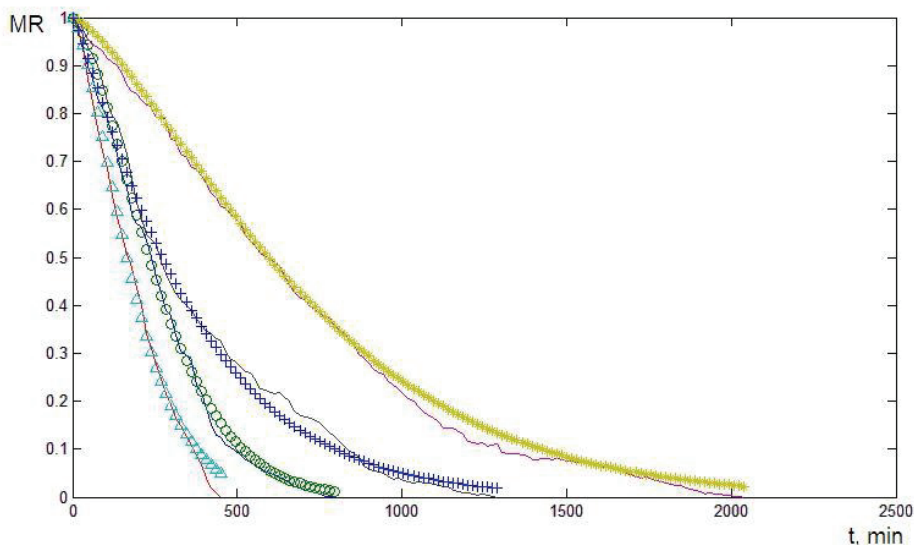
Таблица 1

| №  | Модел  | Име                               |
|----|--|-----------------------------------|
| 1  | $MR = \exp(-kt)$                               | Нютон                             |
| 2  | $MR = \exp(-kt^n)$                             | Пейдж                             |
| 3  | $MR = \exp(-(kt)^n)$                           | Модифициран на Пейдж              |
| 4  | $MR = a \exp(-kt)$                             | Хендерсън и Пейбис                |
| 5  | $MR = a \exp(-kt) + c$                         | Логаритмичен                      |
| 6  | $MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$           | Хендерсън - двучленен             |
| 7  | $MR = 1 + at + bt^2$                           | Ванг и Синг                       |
| 8  | $t = a \ln(MR) + b(\ln(MR))^2$                 | Томсън                            |
| 9  | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$          | Приблизителен дифузен             |
| 10 | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$           | Верма                             |
| 11 | $MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ | Модифициран на Хендерсън и Пейбис |
| 12 | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$          | Двучленен експоненциален          |
| 13 | $MR = a \exp(-c(t/L^2))$                       | Опростен дифузен на Фик           |
| 14 | $MR = \exp(-k(t/L^2)^n)$                       | Модифициран на Пейдж              |

Таблица 2

| $\theta, ^\circ\text{C}$ | $v, \text{m/s}$ | $p$    | $q$    | $R$    |
|--------------------------|-----------------|--------|--------|--------|
| 50                       | 0,5             | 0,0013 | 1,4115 | 0,9991 |
| 50                       | 1               | 0,0018 | 1,2604 | 0,9987 |
| 50                       | 1,5             | 0,0023 | 1,1242 | 0,9980 |
| 50                       | 2               | 0,0025 | 1,1460 | 0,9973 |
| 60                       | 0,5             | 0,0021 | 1,4410 | 0,9992 |
| 60                       | 1               | 0,0028 | 1,3220 | 0,9983 |
| 60                       | 1,5             | 0,0034 | 1,2310 | 0,9979 |
| 60                       | 2               | 0,0035 | 1,2501 | 0,9988 |
| 70                       | 0,5             | 0,0028 | 1,4607 | 0,9992 |
| 70                       | 1               | 0,0035 | 1,4001 | 0,9991 |
| 70                       | 1,5             | 0,0040 | 1,3500 | 0,9984 |
| 70                       | 2               | 0,0041 | 1,3602 | 0,9986 |
| 80                       | 0,5             | 0,0035 | 1,4810 | 0,9985 |
| 80                       | 1               | 0,0040 | 1,4725 | 0,9979 |
| 80                       | 1,5             | 0,0048 | 1,4422 | 0,9980 |
| 80                       | 2               | 0,0048 | 1,4543 | 0,9977 |

На фиг.2 са показани експерименталните и получените по модела криви на сушене при  $\theta=50$  и  $80^\circ\text{C}$  и скорости 0,5 и 2 m/s.



“o” – при температура 80°C и скорост 0,5 m/s;  
 “Λ” – при температура 80°C и скорост 2 m/s;  
 “\*” – при температура 50°C и скорост 0,5 m/s;  
 “+” – при температура 50°C и скорост 2 m/s;

Фиг.2 Експериментални и получени по модела криви на сушене

Адекватността на изведения математичен модел на кривите на сушене на кайсии е доказана чрез критерия на Стюдънт

$$t = \frac{d}{S_d / \sqrt{n}}, \quad (5)$$

където  $d$  е средната стойност на разликите между експерименталното и определеното по модела отношение на влагосъдържанията  $MR$ ;  
 $S_d$  - средноквадратичното отклонение на разликите;  
 $n$  – броят на наблюденията.

Изчислената стойност на критерия на Стюдънт е  $t_{изч} = 0,8823$ , а критичната стойност  $t_{кр}$ , при степени на свобода  $k = n - 1 = 623$ , е  $t_{кр} = t_{\frac{\alpha}{2}, k} = 2,58$ .

Тъй като  $t_{изч} < t_{кр}$ , то моделът е адекватен и може да бъде използван за управление на процеса [3, 6, 7].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Експерименталната установка може да бъде използвана за снемане на кинетичните криви на различни плодове и зеленчуци. Така полученият математичен модел може да се използва за оценка на влагосъдържанието на кайсии във всеки момент от сушилният процес и за управлението му с цел намаляване на енергийните разходи и получаване на продукция с високо качество.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Bon, J., Rossello, C., Femenia, A., Eim, V., Simal, S. Mathematical modeling of drying kinetics for apricots: Influence of the external resistance to mass transfer. *Drying Technology*, 25, 2007, pp.1829-1835.
- [2] Inci Turk Togrul, Dursun Pehlivan. Modeling of drying kinetics of single apricots. *Journal of Food Engineering* 58, 2003, pp. 23-32.
- [3] Md. Raisul Islam, J.C. Ho, A. S. Mujumdar. Convective Drying with Time-Varying Heat Input: Simulation Results. *Drying Technology*, Vol. 21, №7, 2003, pp.1333-1356.
- [4] Mirzaee, E., Rafiee, S., Keyhani, A., Emam-Djomen, Z.. Determining of moisture diffusivity and activation energy in drying of apricots. *Research Agricultural Engineering*, 55, 2009 (3), pp.114-120.
- [5] Mortaza Aghbashlo, Mohammad H. Kianmehr, Hadi Samimi-Akhijahani. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49, pp. 2865-2871.
- [6] Quirijns, E. J., van Willigenburg, L. G. and van Boxtel, A.J.B.. New perspectives for optimal control of drying processes. *International symposium on Advanced Control of Chemical Processes ADCHEM 2000*, pp. 437-442.
- [7] Ugur Yuzgec, Yasar Becerikli, Mustafa Turker. Nonlinear predictive control of a drying process using genetic algorithms. *The Instrumentation, Systems and Automation Society*, Vol. 45, №4, 2006, pp. 589-602.

**За контакти:**

Донка Иванова, катедра "Автоматика, информационна и управляваща техника", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: +359-82-888266, e-mail: [divanova@uni-ruse.bg](mailto:divanova@uni-ruse.bg)

**Докладът е рецензиран.**