

## Investigation of low-temperature drying modes plant capillary-porous materials spherical shape

V.M. Pazyuk

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, str. Bulakhovskogo, 2, Bldg. 2, Kyiv, 03164, Ukraine  
Tel.: +380444249638  
E-mail: vadim\_pazuk@ukr.net*

*Article info: received 21.10.2018, revised 25.10.2018, accepted 27.11.2018*

*Pazyuk, V.M. (2018) Investigation of low-temperature drying modes plant capillary-porous materials spherical shape 4(41), doi: 10.26909/csl.4.2018.1*

The results of experimental studies of the drying of capillary-porous materials of spherical shape from the influence of the temperature of the heat carrier are given.

Spherical granules with a diameter of 2,2 mm were taken to determine the rational modes of drying of capillary-porous materials. For a better evaluation of the nature of the drying process, experimental design studies were carried out on a convective drying stand in an elementary layer.

The program of automatic collection and processing of information allows obtaining data on changes in the mass and temperature of the sample during the removal of moisture, and also performs calculations of kinetics of drying in absolute and relative coordinates. This makes it possible to obtain and compare the kinetic and velocity characteristics of colloid capillary-porous materials drying faster, more accurately and reliably.

By the method of Krasnikov V.V. the kinetics of drying of capillary-porous materials of spherical shape with a diameter of 2,2 mm with construction of a generalized drying curve with determination and calculation of drying coefficients is considered.

The generalized curve of drying rate is constructed and obtained, which allows us to generalize the process of drying of a capillary-porous spherical material. Also, get the formula and determine the overall length of the drying process through the drying rate for each heat treatment.

When comparing the values of the process length obtained by experimental studies and determined by the calculations, the experimental error from the calculation does not exceed 3 %.

The analysis of heat-mass-exchange processes of drying by means of calculations of temperature coefficient  $b$ , Re-binder  $R_b$  criterion, heat flow  $q$  and coefficient of heat transfer  $\alpha$  from the influence of heat carrier temperature has been carried out.

Key words: capillary-porous materials, drying, kinetics, generalized curve, drying rate.

## Дослідження низькотемпературних режимів сушіння рослинних капілярно-пористих матеріалів сферичної форми

В.М. Пазюк

*Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна*

Наведені результати експериментальних досліджень сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми від впливу температури теплоносія.

За методом Краснікова В.В. розглянута кінетика сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми діаметром 2,2 мм з побудовою узагальненої кривої сушіння з визначенням та розрахунком коефіцієнтів сушіння.

Побудовані і отримані рівняння узагальнена крива швидкості сушіння та тривалості процесу сушіння.

Проведений аналіз тепломасообмінних процесів сушіння за допомогою розрахунків температурного коефіцієнта  $b$ , критерію Ребіндера  $R_b$ , теплового потоку  $q$  та коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  від впливу температури теплоносія.

## Вступ

Для визначення раціональних режимів сушіння капілярно-пористих матеріалів були взяті сферичні гранули діаметром 2,2 мм. Для кращої оцінки характеру проведення процесу сушіння експериментальні дослідження зразка проводились на конвективному сушильному стенді в елементарному шарі. Експериментальний конвективний сушильний стенд дає можливість оцінити кінетику сушіння, інтенсивність приведених режимів, а також зміну температури теплоносія та матеріалу під час сушіння [1].

Програма автоматичного збору та обробки інформації дає данні про зміну маси та температури зразка в ході видалення вологи, а також виконує розрахунки кінетики сушіння в абсолютних та відносних координатах. Це дає змогу більш точно, оперативної та надійно одержувати та порівнювати кінетичні та швидкісні характеристики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

## Матеріали та методи дослідження

Проведення експериментальних досліджень проводилось на конвективному сушильному стенді за наступною методикою:

1. Перед проведенням досліджень визначаємо початкову вологість матеріалу, засипаємо в бюкси і висушуємо в сушильній шафі при температурі 105 °С на протязі 5 годин. Після закінчення сушіння бюкси виймають з сушильної шафи і ставлять в екзикатор для охолодження на 15-30 хв. Охоложені бюкси зважують у закритому стані на аналітичних вагах.

2. Вологість відносно маси сухої речовини обчислюють у відсотках:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$m_1$  – маса порожньої бюкси (з кришкою), г;  $m_2$  – маса бюкси з наважкою до сушіння, г;  $m_3$  – маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

3. Після встановлення на стенді режиму сушіння на штангу терезів в сушильній камері 1 кладуть на решітку зразок і вмикається комп'ютерна програма збору та обробки інформації, яка безперервно реєструє час дослідження, температуру теплоносія, температуру на поверхні та в середині шару матеріалу, зміну маси навески.

4. Після визначення абсолютно сухої маси зразка комп'ютерна програма визначає поточну вологість матеріалу  $W$  під час сушіння та розраховує і

будує криві сушіння та швидкості сушіння:  $W = f(\tau)$ ,  $dW/d\tau = f(W)$ .

5. Проводять розрахунок наступних характеристик [2]:

### 5.1. Кінетика процесу сушіння:

$$W(t) = \frac{G(t) - G_{a.c.}}{G_{a.c.}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де  $G(t)$  – розрахунки маси зразка, г;  $G_{a.c.}$  – абсолютно суха маса матеріалу, г.

### 5.2. Швидкість сушіння визначається:

$$N = \frac{dW}{d\tau}. \quad (3)$$

5.3. Температурний коефіцієнт сушіння представляє собою похідну середньої температури зразка від вологовмісту:

$$b = dt_{cp} / dU, \quad (4)$$

де  $U = W / 100$  – вологовміст зразка, %;  $t_{cp}$  – вираховується як середнє значення розрахунку температури на поверхні та в матеріалі зразка, °С.

5.4. Число Ребіндера дорівнює відношенню витрат кількості тепла на нагрівання тіла до кількості тепла на випаровування вологи за нескінченно малий проміжок часу:

$$Rb = \frac{c}{r} b, \quad (5)$$

де  $c$  – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг °С);  $r$  – питома теплота фазового перетворення, кДж/кг.

5.5. Тепловий потік на одиницю поверхні зразка вираховується із співвідношення:

$$q(\tau) = rg(dU / d\tau)(1 + Rb), \quad (6)$$

де  $g = G_{a.c.} / S_{вн}$  – відношення маси абсолютно сухого тіла до поверхні матеріалу.

5.6. Коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{1000 \cdot q(\tau)}{t - t_{II}}, \quad (7)$$

де  $t$  – температура теплоносія;  $t_{II}$  – температура поверхні зразка.

## Результати та їх обговорення

Для визначення особливостей сушіння капілярно-пористого матеріалу діаметром 2,2 мм проводили сушіння із температурою теплоносія 50 – 80 °С, що представлені на рис. 1.

Криві швидкості сушіння показали, що одночасно відбувається прогрівання та видалення вологи з матеріалу, процес сушіння проходить в періоді падаючої швидкості сушіння (рис. 2).

Інтенсивність сушіння збільшується при підвищенні температури теплоносія від 50 до 80 °С, так швидкість сушіння майже в 1,9 рази більше в режимі сушіння 80 °С при порівнянні з режимом сушіння 50 °С.

Кінцева температура нагрівання при сушінні капілярно-пористих матеріалів діаметром 2,2 мм, складає: 50 °С – 48,2 °С; 60 °С – 58,2 °С; 70 °С – 68,16 °С та 80 °С – 78,9 °С.

Для характеристики процесу в цілому необхідно побудувати узагальнені криві сушіння, які будуть характеризувати загальний процес сушіння незалежно від режиму сушіння (рис. 3) [3].

Для дослідження кінетики вологообміну капілярно-пористих матеріалів сферичної форми діаметром 2,2 мм, проводимо побудову узагальненої кривої сушіння в системі напівлогарифмічних координатах  $\lg(W-W_p)$  від часу проведення дослідів (рис. 4).

З узагальненої кривої сушіння отримуємо узагальнену криву швидкості сушіння та визначені

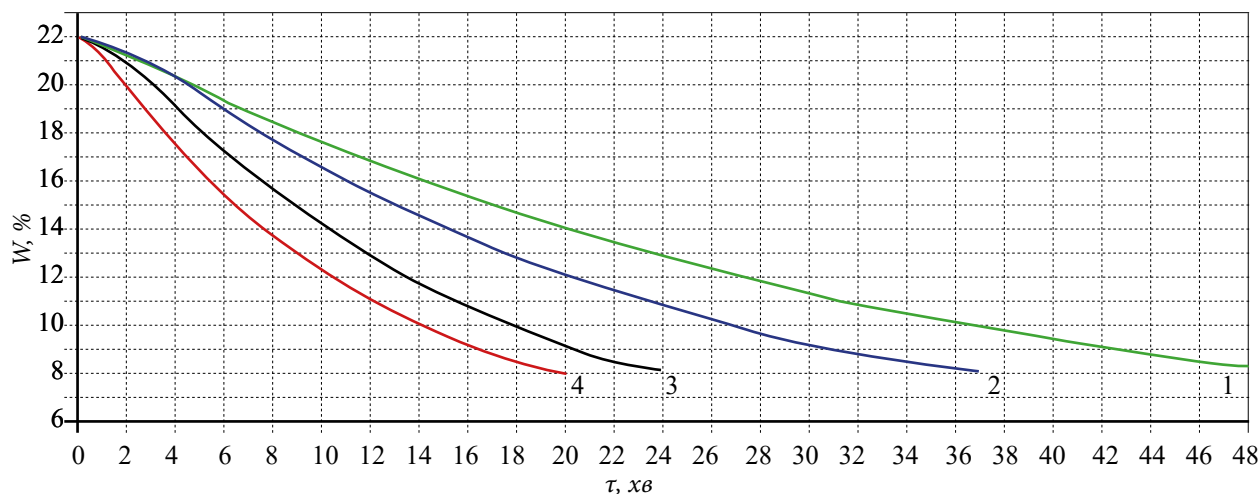


Рис. 1. Вплив температури теплоносія на кінетику процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів діаметром 2,2 мм:  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.: 1 – 50 °С, 2 – 60 °С, 3 – 70 °С, 4 – 80 °С

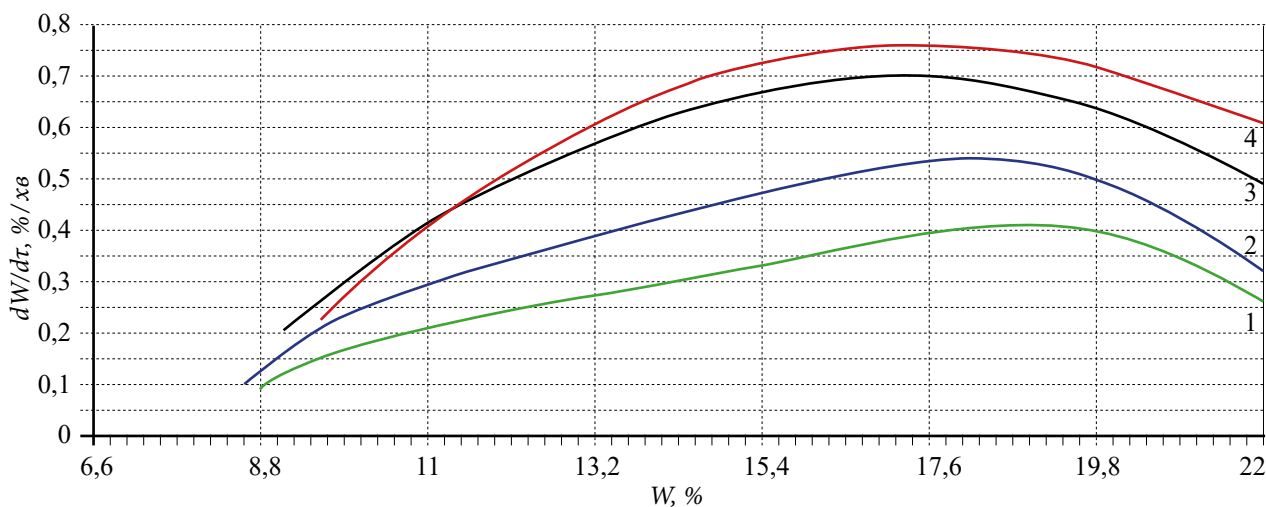


Рис. 2. Криві швидкості сушіння капілярно-пористих матеріалів діаметром 2,2 мм:  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.  $W_n = 22$  %: 1 – 50 °С, 2 – 60 °С, 3 – 70 °С, 4 – 80 °С

відносні та кінетичні коефіцієнти сушіння за формулою 8.

Відносні коефіцієнти сушіння визначаються з дослідної кривої за наступним виразом:

$$\chi_1 = \frac{\lg(W_{K_1} - W_p) - \lg(W_{K_2} - W_p)}{N \max \tau_1}, \quad (8)$$

$$\chi_2 = \frac{\lg(W_{K_2} - W_p) - \lg(W_{K_3} - W_p)}{N \max \tau_2}. \quad (9)$$

Представлена узагальнена крива сушіння матеріалу в напівлогарифмічних координатах на рис. 5 вказують на те, що другий період складається з двох частин з критичними точками  $K_1$  та  $K_2$ .

Після визначення відносних коефіцієнтів сушіння визначаємо кінетичні коефіцієнти сушіння:

$$K_1 = \chi_1 N, \quad (10)$$

$$K_2 = \chi_2 N. \quad (11)$$

Розраховані значення коефіцієнтів заносимо в табл. 1.

Проводячи графічне диференціювання узагальнених кривих кінетики сушіння, представлених на рис. 5 отримані узагальнені швидкості сушіння, які визначаються за формулою (12).

Величина відносної швидкості сушіння при даному  $W$ , яка знаходиться з узагальненої кривої су-

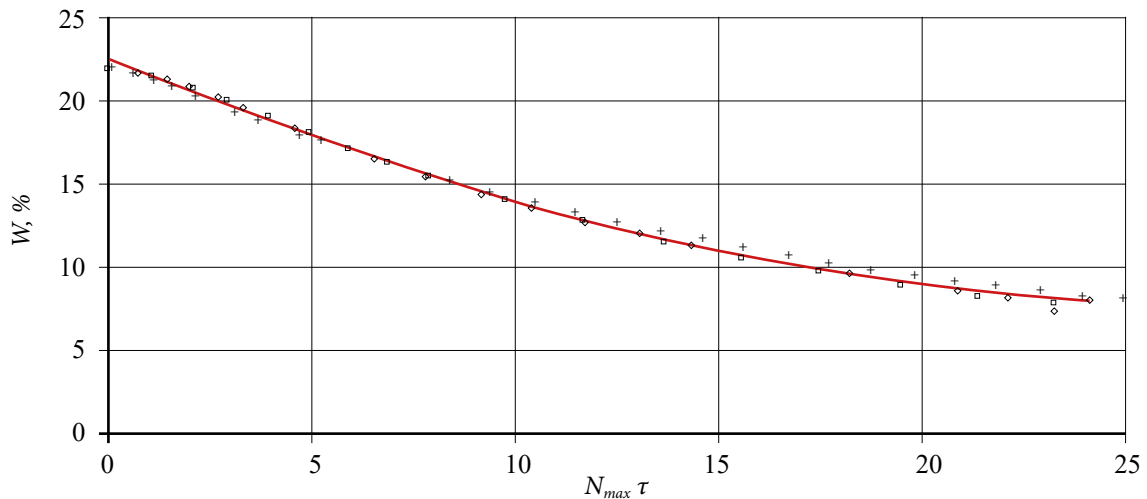


Рис. 4. Узагальнені криві сушіння капілярно-пористих матеріалів в системі координат  $W - N_{max} \tau$  (за методом Краснікова В.В.)

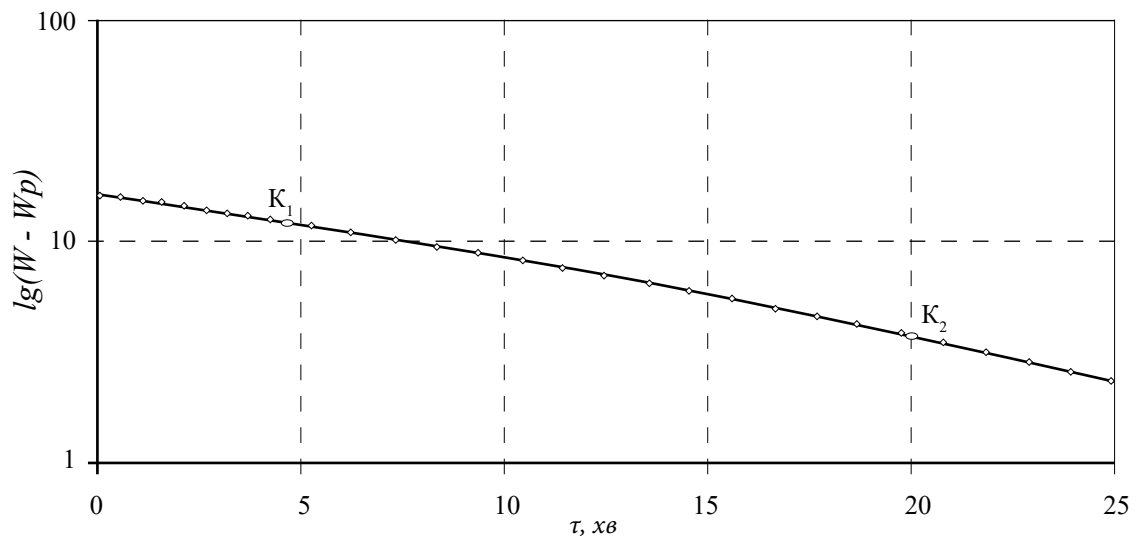


Рис. 5. Узагальнені криві сушіння насіння в напівлогарифмічній системі координат

шіння  $W - N\tau$ , чисельно рівна тангенсу кута нахилу кривої точки  $W$  до вісі  $N\tau$ , тобто  $N^*$  знаходиться безпосередньо з узагальненої кривої сушіння:

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{dW}{d\tau} = \operatorname{tg}(W, N\tau) = f(W). \quad (12)$$

Величина  $N^*$  не залежить від режимів сушіння і для конкретних матеріалів при даних методах сушіння є функцією вологовмісту.

Узагальнені криві швидкості сушіння представлені плавними нахильними кривими з періодами прогрівання та падаючою швидкістю сушіння. З метою описання залежностей  $N^*$  від  $W$  узагальнені криві швидкості сушіння побудовані в напівлогарифмічних координатах (рис. 6).

З рис. 6 видно, що в напівлогарифмічних координатах узагальнені швидкості сушіння представлені собою ломані лінії, які складаються з двох прямих. Закон зміни при переході від однієї частини до другої частини змінюється, що вказує на відмінність в кінетики та динаміки сушіння в різних частинах процесу сушіння.

Величини  $N^*$  в різних частинах процесу сушіння в другому періоді не враховує період прогрівання матеріалу і визначається за наступними емпіричними залежностями представлені в табл. 2.

Загальна тривалість сушіння насіння розрахована за формулою (13):

$$\tau_{\text{роз}} = \frac{1}{N} (W_n - W_{\kappa_1} + \frac{1}{\chi_1} \lg \frac{W_{\kappa_1} - W_p}{W_{\kappa_2} - W_p} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{\kappa_2} - W_p}{W_{\kappa_3} - W_p} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{\kappa_3} - W_p}{W_{\kappa_4} - W_p}). \quad (13)$$

Таблиця 1.

Відносні та кінетичні коефіцієнти сушіння капілярно-пористих матеріалів діаметром 2,2 мм

Діапазон між критичними значеннями вологості, %	Відносні коефіцієнти сушки		Кінетичні коефіцієнти сушки	
	$\chi_1$	$\chi_2$	$K_1$	$K_2$
18,32 – 9,14	0,02	-	0,013	-
9,14 – 8,13	-	0,0125	-	0,0081

Таблиця 2.

Значення узагальненої швидкості сушіння капілярно-пористих матеріалів діаметром 2,2 мм

Діапазон між критичними значеннями вологості, %	Значення узагальненої швидкості сушіння
18,32 – 9,14	$N^* = 0,1424e^{0,1103W}$
9,14 – 8,13	$N^* = 0,0001e^{1,4505W}$

Загальна тривалість процесу:

$$\tau = \frac{23,58}{N}.$$

На рис. 7 приведено співставлення дослідної  $\tau_{\text{дос}}$  і розрахункової  $\tau_{\text{роз}}$  тривалості сушіння капілярно-пористих матеріалів діаметром 2,2 мм при різних режимах сушіння.

Величина  $\tau_{\text{роз}}$  вираховується за формулою (13) і наближена до дослідної. Похибка дослідної від розрахункової не перевищує 3 %.

За формулами 4 – 7 проводимо розрахунки температурного коефіцієнта  $b$ , критерію Ребіндера  $Rb$ , теплового потоку  $q$  та коефіцієнту тепловіддачі  $a$ , що представлені на рис. 8 – 11.

При збільшенні температури від 50 до 80 °C температурний коефіцієнт збільшується майже в 5 разів, що говорить про більш інтенсивне прогрівання матеріалу. Після прогрівання матеріалу і видалення вологи, в основному після 20 % відбувається активне видалення вологи, що спостерігається зниження значення температурного коефіцієнту (рис. 8). Також це можна спостерігати при визначення критерію  $Rb$  (рис. 9) і теплового потоку  $q$  (рис. 10).

Низьке значення критерію Ребіндера говорить про інтенсивне випаровування вологи з капілярно-пористого матеріалу під час сушіння.

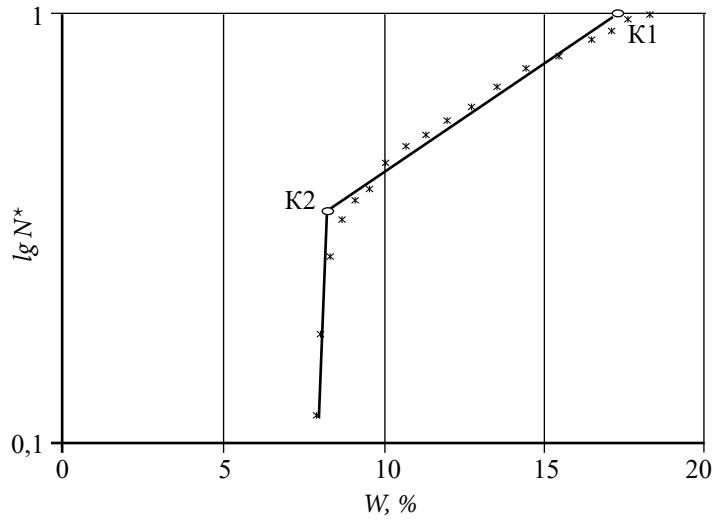


Рис. 6. Узагальнені криві швидкості сушіння

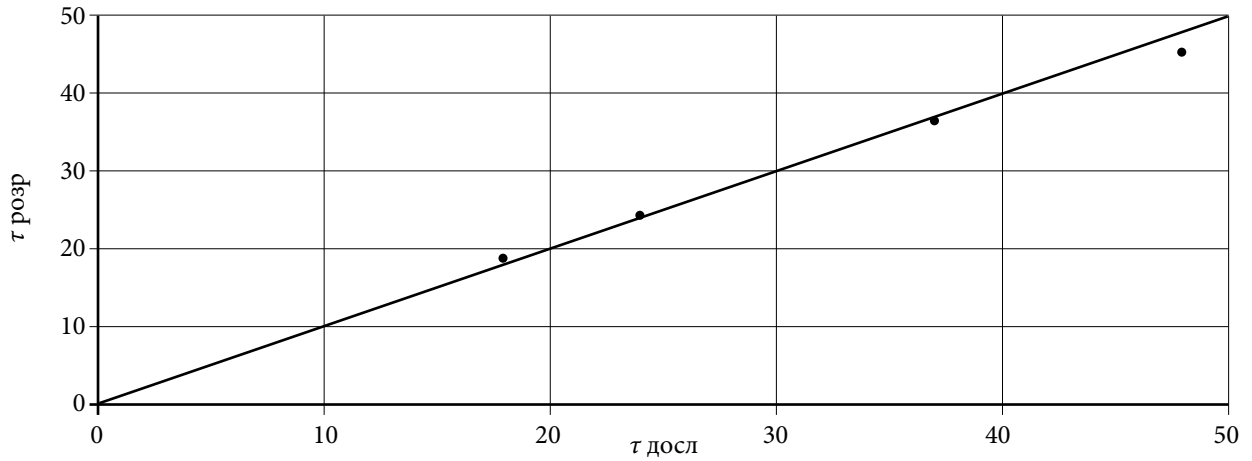


Рис. 7. Співставлення дослідної та розрахункової тривалості сушіння капілярно-пористих матеріалів діаметром 2,2 мм

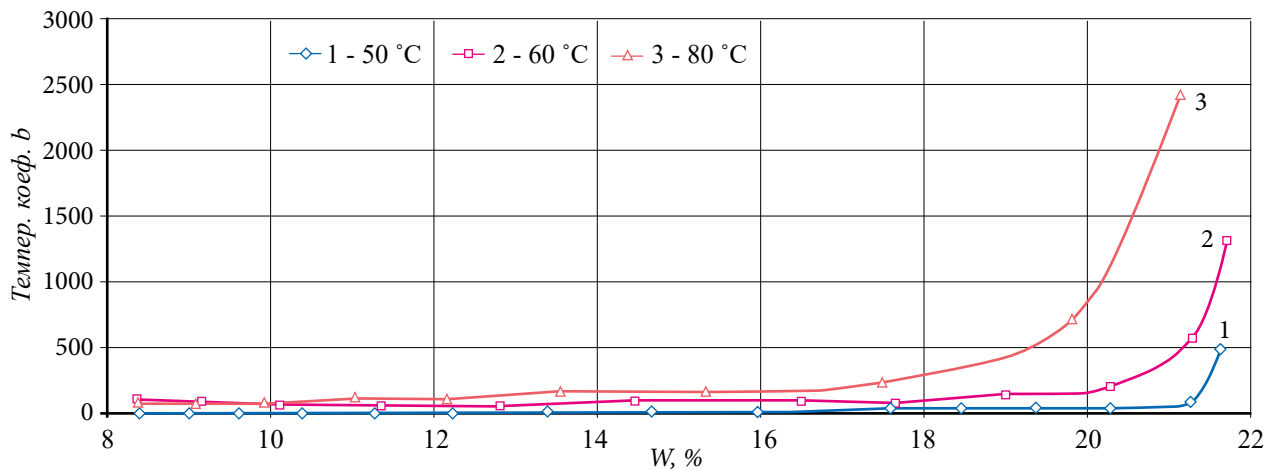


Рис. 8. Залежність температурного коефіцієнта від вологості матеріалу

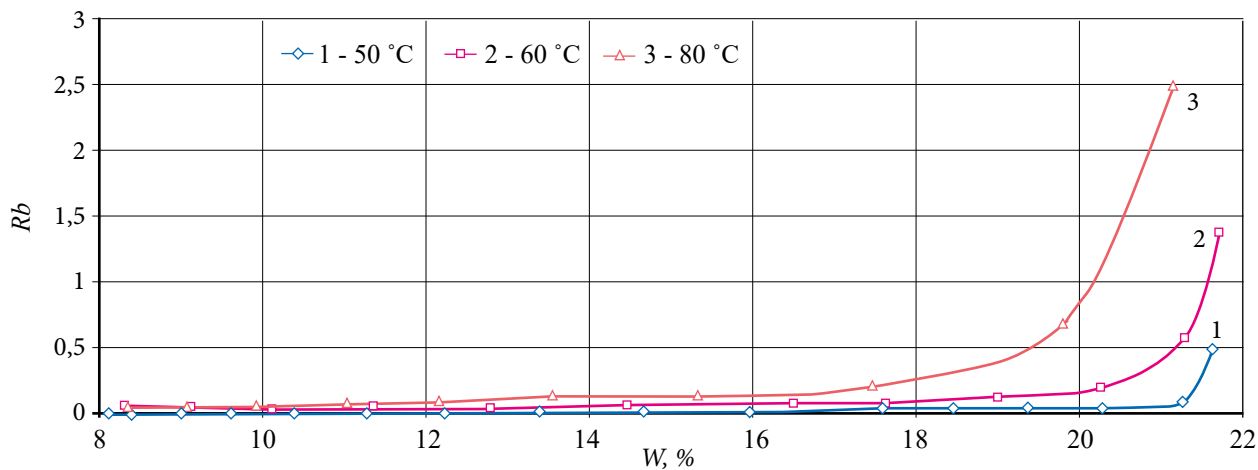


Рис. 9. Залежність критерію Ребіндера від вологості матеріалу

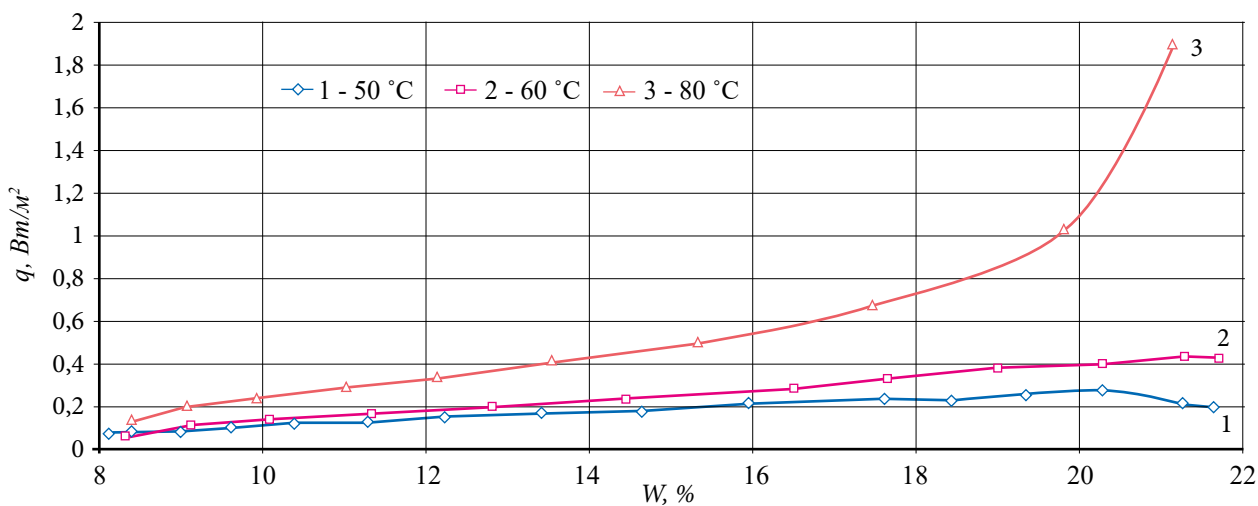


Рис. 10. Зміна теплового потоку від вологості матеріалу

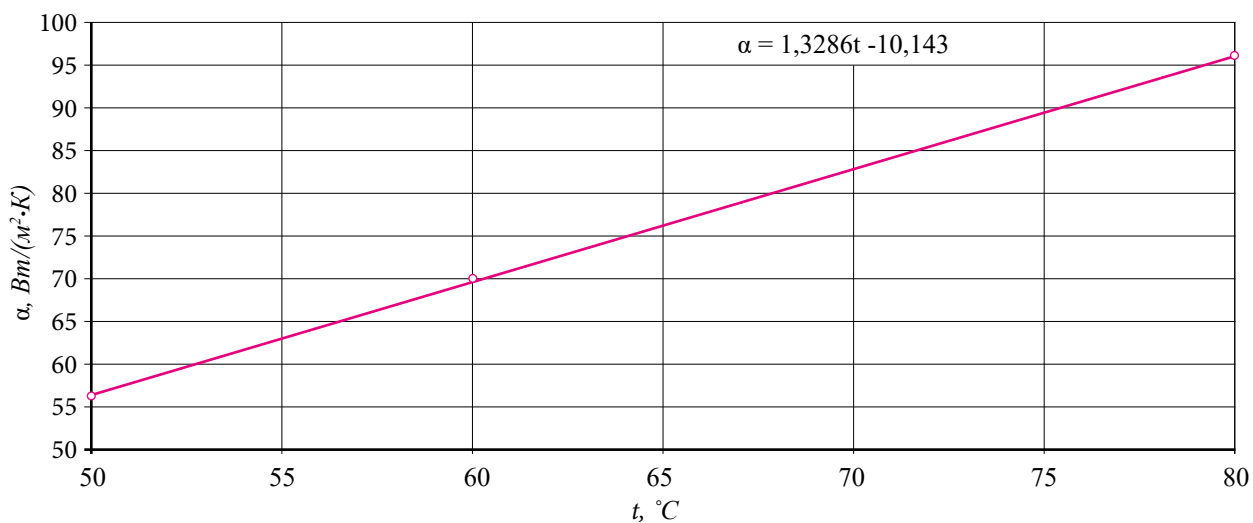


Рис. 11. Зміна коефіцієнта тепловіддачі від режиму сушіння

Тепловий потік в капілярно-пористому матеріалі залежить від температури теплоносія і його значення може змінюватись від 0,2 до 1,9 Вт/м<sup>2</sup>.

Все ж таки при температурі 50 та 60 °С значення теплового потоку порівняно не високе і при зниженні вологості матеріалу поступово знижується.

Коефіцієнт тепловіддачі змінюється за лінійним законом, так зміна від 50 до 60 °С збільшує його значення в 1,76 рази (рис. 11).

Отримане лінійне рівняння  $\alpha = f(t)$  може бути використано для знаходження коефіцієнта тепловіддачі при різних режимах сушіння капілярно-пористих матеріалів діаметром 2,2 в діапазоні від 50 до 80 °С:

$$\alpha = 1,3286t - 10,143.$$

Значення коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  збільшується від температури теплоносія на 40 Вт/(м<sup>2</sup>·К) в діапазоні температур від 50 °С до 80 °С.

### Висновки

1. Дослідження кінетики сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми з діаметром 2,2 мм вказало, що зміна температури від 50 до 80 °С зменшує тривалість сушіння в 2,4 рази.

2. Дослідження кінетики процесу сушіння за методом Краснікова В.В. показало, що процес сушіння проходить в період падаючої швидкості сушіння з критичними точками  $K_1$  та  $K_2$ . Значення коефіцієнтів  $K_1 = 0,013$ , а  $K_2 = 0,0081$ .

3. Отримана формула загальної тривалості процесу сушіння та проведення співставлення дослідної та розрахункової тривалості сушіння, що не перевищує 3 %.

4. Проведений аналіз тепломасообмінних процесів сушіння за допомогою розрахунків температурного коефіцієнта  $b$ , критерію Ребіндера  $Rb$ , теплового потоку  $q$  та коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$ . На початку процесу йде активне прогрівання матеріалу з наступним випаровуванням, величина температурного коефіцієнту на початку процесу сушіння вища в 5 разів при порівнянні температури 80 та 50 °С.

5. Коефіцієнт тепловіддачі при температурі теплоносія 50 °С становить  $\alpha = 57$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а при 80 °С -  $\alpha = 97$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), тобто збільшення температури збільшує його значення в 1,76 раз.

### References

1. Pazyuk, V., Petrova, Zn., Chepeliuk, O. Determination of rational modes of pumpkin seeds drying. *Ukrainian Journal of Food Science*. – 2018. – Volume 7, Issue 1. – P. 135 – 150.
2. Стабников, В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В.Н. Стабников, В.М. Лысянский, В.Д. Попов и др. – М.: Агропромиздат. – 1985. – 503 с.
3. Красников, В.В. Кондуктивная сушка / В.В. Красников. – М.: Энергия. – 1973. – 288 с.