

## **Energy-efficient modes of drying of colloidal capillary-porous materials**

Zh.O. Petrova

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

*Article info: received 21.09.2018, revised 25.09.2018, accepted 27.09.2018*

*Petrova, Zh.O. (2018) Energy-efficient modes of drying of colloidal capillary-porous materials 3(40), doi: 10.26909/csl.3.2018.3*

The processes of convective drying are among the most energy intensive industrial processes. The energy consumption for moisture removal reaches 3000 - 5000 kJ/kg or more, therefore the decision to reduce energy consumption during drying is an actual scientific and technical task. One of the ways to solve this problem is to develop energy-efficient drying regimes.

Analytical calculation of the process of drying of colloidal capillary - porous materials is quite complicated, because it is necessary to know a number of individual values for this product. In this work, the process of convection drying of organic colloidal capillary-porous material was investigated. The process is investigated experimentally using mono-raine and composition in a certain ratio of materials. As a significant increase in the energy costs of drying is usually associated with the complexity of removing moisture from the material, the kinetics of which is due to the mobility of water molecules and the energy of their interaction with other molecules, so it was important to study the changes in the specific heat of evaporation of water from mono-reagents, compositions from them.

In the course of the research, new regularities were established and synthesized when drying composite raw materials. The heat of evaporation of mono and composite raw materials is determined, which is less in the composition than in the mono-raine. For the organization of the economic and energy process of drying organic colloidal capillary-porous raw materials and improving the quality of the dry product, it is most appropriate to create compositions and to use step-by-step modes of the energy trailer with a decrease in the temperature of the coolant with a decrease in the moisture content of the material.

Calculated intensity and duration of dehydration of mixtures.

The density of heat flux is calculated, which is spent on evaporation of moisture depending on the intensity of evaporation and the moisture content of the material.

Investigated the dependence of the Rebinder (as a drying optimization criterion) on the moisture content of the material, which substantiates the effectiveness of the proposed stepped drying regimes.

Key words: energy-efficient drying regimes, capillary-porous materials.

## **Енергоєфективні режими сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів**

Ж.О. Петрова

*Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна*

Процеси конвективного сушіння відносяться до найбільших енергоємних промислових технологічних процесів. Затрати енергії на видалення вологи досягають 3000 – 5000 кДж/кг і більше, тому вирішення питання зменшення енергоспоживання при сушінні є актуальним науково-технічним завданням. Одним із шляхів вирішення даної проблеми є розробка енергоєфективних режимів сушіння.

Аналітичний розрахунок процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів досить складний, оскільки необхідно знати ряд індивідуальних величин для даного продукту. В даній роботі досліджували процес конвективного сушіння композитного колоїдного капілярно-пористого матеріалу. Процес досліджується екс-

периментально з використанням моносировини та композиції у певному співвідношенні матеріалів. Оскільки істотне збільшення енергетичних витрат на сушіння звичайно пов'язують з складністю видалення вологи з матеріалу, кінетика якого обумовлена рухливістю молекул води та енергією їх взаємодії з іншими молекулами, тому важливо було дослідити зміни питомої теплоти випаровування води з моносировини, композиції з них.

В процесі дослідження встановлені та узагальнені нові закономірності при сушінні композиційної сировини. Визначена теплота випаровування моно та композиційної сировини, яка в композиції менша ніж в моносировині. Для організації економічного та енергетичного процесу сушіння органічної колоїдної капілярно-пористої сировини та підвищення якості сухого продукту найбільш доцільно створення композицій та використання ступеневих режимів енергопідведення із зниженням температури теплоносія із зменшенням вологовмісту матеріалу.

Розраховані інтенсивність та тривалість зневоднення сумішей.

Розрахована густина теплового потоку, яка витрачається на випаровування вологи в залежності від інтенсивності випаровування і вологовмісту матеріалу.

Досліджено залежність числа Ребіндера (як критерію оптимізації сушки) від вологовмісту матеріалу, що обґрунтовує ефективність запропонованих ступеневих режимів сушки.

## Вступ

Враховуючи загальну тенденцію енергоспоживання, що веде до збільшення кількості спожитої енергії в усьому світі, вартість цієї енергії безперервно підвищується та зростає її дефіцит. Тому гостро стоять проблеми створення та широкомасштабного впровадження сучасних енергоефективних теплотехнологій та обладнання, які забезпечують екологічність процесу при максимальному збереженні якості сировини, скорочення енергоносіїв.

Питання енергоефективності способів сушіння є одним із найбільш актуальних напрямків досліджень в сучасній науці [1]. Процес сушіння колоїдних капілярно - пористих матеріалів - одночасно теплотехнічний і технологічний процес, при якому змінюються технологічні і якісні властивості матеріалу [2].

Актуальним завданням є розробка технології та обладнання, яке дозволить проводити сушіння при змінних теплових режимах. Ведення процесу конвективного сушіння в режимах багатостадійного зневоднення підвищить ефективність процесу та максимальне збереження якості вихідного матеріалу [3].

## Матеріали та методи дослідження

Для визначення питомої теплоти випаровування функціональної сировини використовується диференційований мікрокалориметр, розроблений у відділі теплотрії Інституту технічної теплофізики НАН України [4].

Диференційний мікрокалориметр поєднує в собі калориметричний та термогравиметричний аналіз, призначений для визначення питомої теплоти випаровування в процесу сушіння функціональної сировини.

Прилад ДМК1 - 01 є експериментальним зразком і призначений для застосування як робочий при-

стрій вимірювання питомої теплоти випаровування рідини з твердих та рідких речовин при їх сушінні. Прилад, загальний вигляд якого показаний на рис. 1, являє собою сукупність функціонально поєднаних: теплового блоку, аналітичних ваг, компресора, електронного блоку і персонального комп'ютера із відповідним програмним забезпеченням.

Тепловий блок призначений для розміщення проби дослідної речовини і еталону ізотермічного режиму випаровування вологи дослідного зразка.

Для визначення теплових потоків кожного осередку використовуються термоелектричні перетворювачі теплового потоку. Метрологічну атестацію і періодичну перевірку перетворювача теплового потоку проводять методом компарування з використанням спеціалізованого еталонного перетворювача теплового потоку, атестованого в установці високої точності.

Принципова схема приладу наведена на рис. 1.

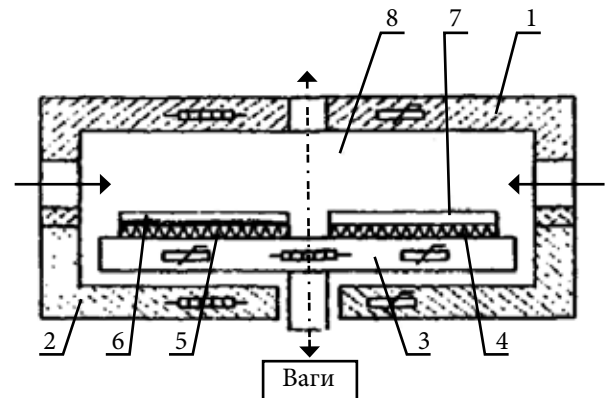


Рис. 1. Принципова схема диференційованого мікрокалориметру: 1, 2 – верхній та нижній термостатовані блоки; 3 – калориметрична платформа із основним електропідігрівачем; 4, 5 – перетворювачі теплового потоку; 6 – осередок з пробєю дослідного зразка; 7 – осередок з еталоном; 8 – робоча камера

При розрахунках енергетичних витрат на сушіння використовують значення питомої теплоти випаровування води. Практика сушіння цілого ряду складних композитних матеріалів вказує на істотну відмінність реальних значень теплоти, що витрачається на випаровування води від розрахункових.

На рис. 2 показано порівняння теплоти випаровування чистої води, зразки дослідного матеріалу моносировини та композиція з нею, при співвідношенні (3:1), температурі  $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  та швидкості повітря  $v = 0,4\text{ см/с}$ .

З рис. 2 видно, що суміш має на 4 – 5 % меншу теплоту випаровування на відміну від сировини 1 та сировини 2 окремо. Можна припустити, що відбувається хімічний вплив, за рахунок активності компонентів. Під час цього впливу збільшується вологовіддача, більш інтенсивніше випаровується вільна волога і, відповідно, зменшується теплота випаровування.

### Результати та їх обговорення

В подальшому дослідження процесу сушіння сировини проводили на дослідно-промисловій установці, що відбувається в період постійної та спадаючої швидкості сушіння (рис. 3) [2]. Використання ступеневих режимів 100/60  $^{\circ}\text{C}$ , порівняно з режимом 60  $^{\circ}\text{C}$ , дозволило знизити тривалість сушіння на 20,5 % (рис. 3, а), а швидкість сушіння збільшити в 1,3 рази (рис. 3, б).

На початку процесу в ступінчастому режимі сушіння в період постійної швидкості сушіння температура теплоносія максимальна – відбувається інтен-

сивне випаровування вологи з матеріалу (рис. 3, в), при цьому питомі енергетичні витрати мінімальні і становлять 3450 кДж/кг випареної вологи.

У другому періоді сушіння відбувається зменшення інтенсивності видалення вологи і температуру теплоносія зменшують, тому що температура матеріалу та середні енергетичні витрати підвищуються (рис. 3, в).

Загальні витрати теплоти, як видно з рис. 3, г при ступеневому режимі на 30-49 % менші ніж при одноступеневих режимах, при цьому якість продукту відповідає режиму  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Тривалість процесу сушіння функціональної сировини на експериментальному конвективному стенді вираховувалась за методом В.В. Красникова.

Для аналізу представлена органічна сировина на основі композицій. Узагальнені криві сушіння в координатах  $W - (N\tau)$  показані на рис. 4.

Суміщення кривих сушіння, отриманих при різних режимах в одну криву, підтверджує, що узагальнена крива сушіння достатньо адекватно описує процес і не залежить від режиму сушіння.

Проводячи графічне диференціювання узагальнених кривих кінетики сушіння, представлених на рис. 4, отримано узагальнені швидкості сушіння, що визначаються наступним виразом:

$$N^* = \left| \frac{dW}{d\tau} \right| \div N = \frac{dW}{Nd\tau} = tg(W, N\tau) = f(W) \quad (1)$$

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

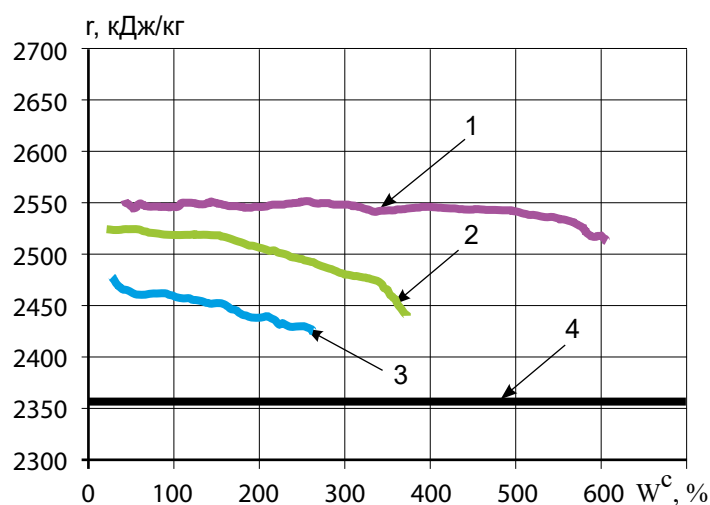


Рис. 2. Порівняльна характеристика теплоти випаровування композитної сировини та композиції ( $^{\circ}\text{C}$ ):  
1 – композитна сировина 1; 2 – композитна сировина 2; 3 – суміш; 4 – вода

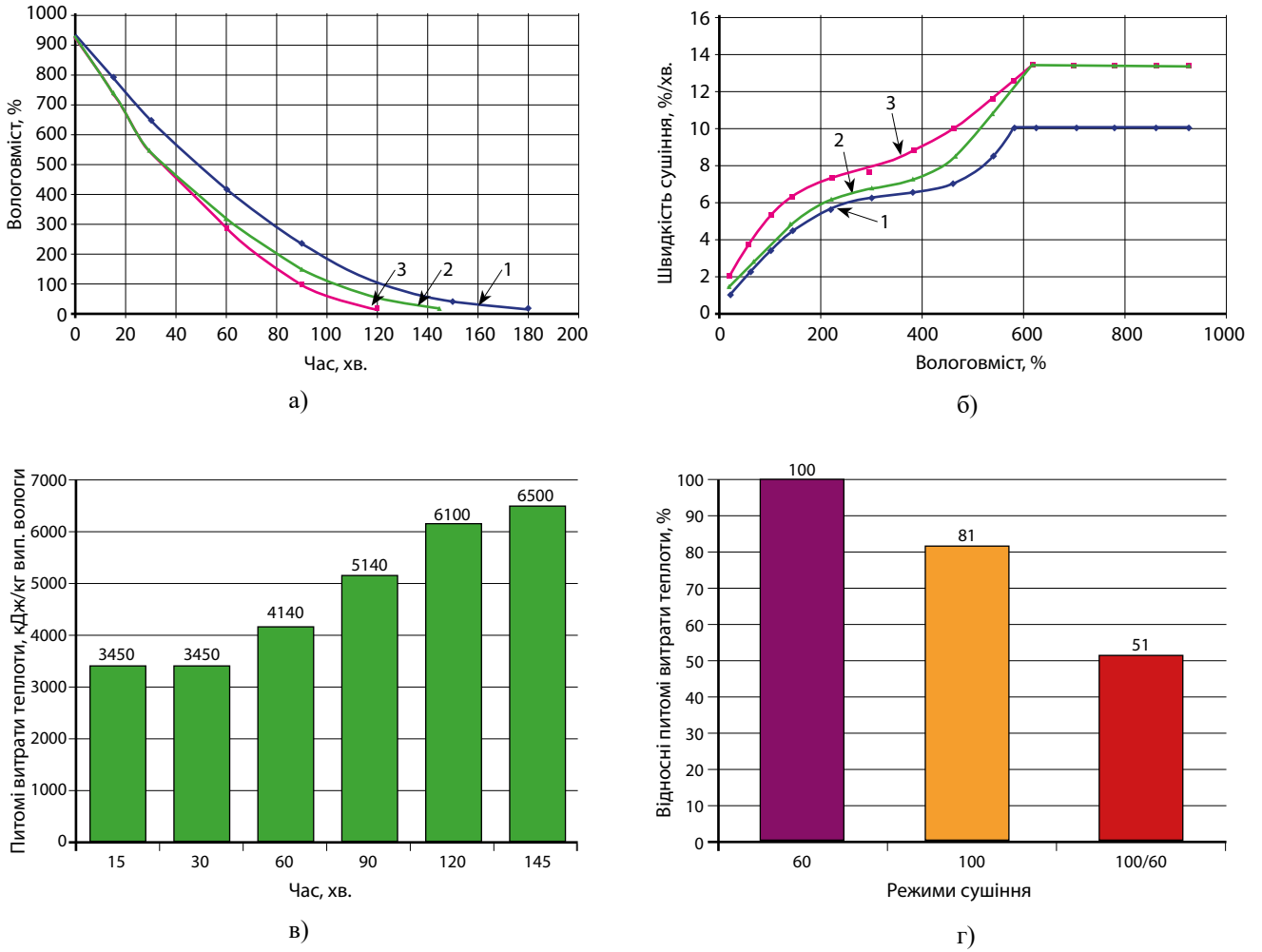


Рис. 3. Кінетика процесу (а, б) та енергетичні витрати (в, г) при сушінні сировини на дослідно-промисловій сушарці при температурі теплоносія: 1 – 60 °С; 2 – 100/60 °С; 3 – 100 °С

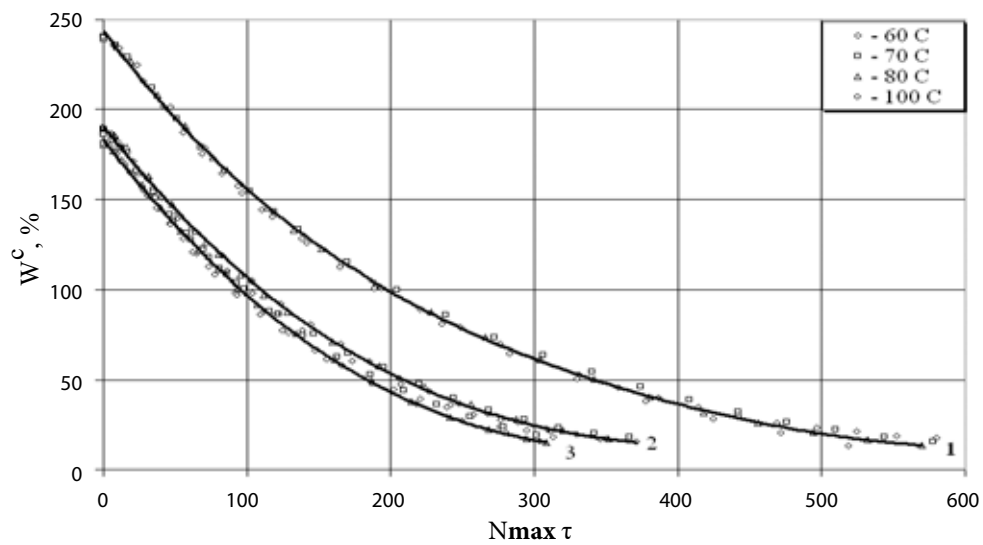


Рис. 4. Узагальнені криві кінетики сушіння композитної сировини від впливу температури теплоносія: 1 – суміш №1; 2 – суміш №2; 3 – суміш №3

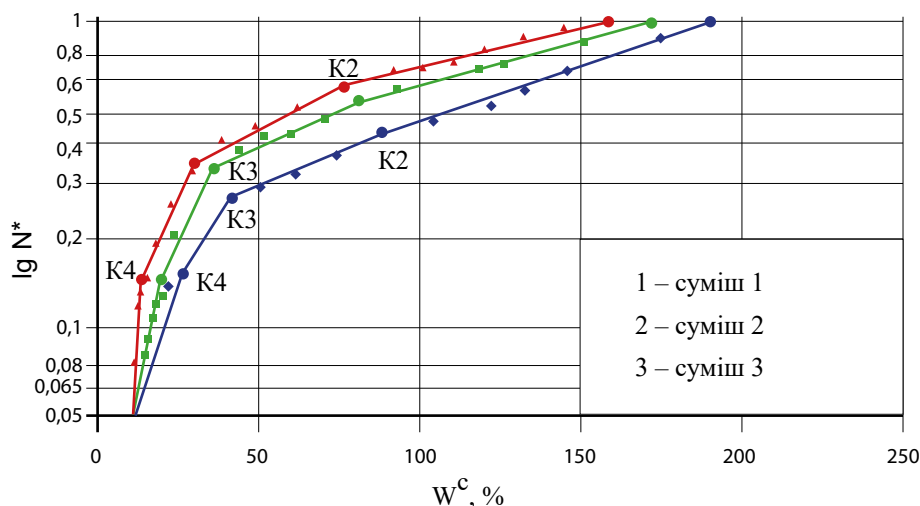


Рис. 5. Узагальненні криві швидкості сушіння органічної сировини від впливу температури теплоносія при тем-пературі  $t = 60, 70, 80, 100$  °С

З рис. 5 видно, що узагальнені швидкості сушіння показані в напівлогарифмічних координатах, представляють собою ламані лінії, які складаються з чотирьох прямих. Закон зміни при переході від однієї частини до другої змінюється, що вказує на відмінність в кінетиці та динаміці сушіння в різних частинах процесу сушіння.

Узагальнені криві кінетики сушіння органічних

сумішей дозволили визначити відносні коефіцієнти сушіння другого періоду. Відносний коефіцієнт сушіння  $\chi$  визначається лише формулою зв'язку вологи з матеріалом, його структурою, щільністю і не залежить від режиму обробки. Визначено розрахункові тривалості сушіння функціональної сировини та швидкості сушіння.

Загальна тривалість процесу:

$$\tau_r = \frac{1}{N} (Wn - W_{K_1} + \frac{1}{\chi_1} \lg \frac{W_{K_1} - W_p}{W_{K_2} - W_p} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{K_2} - W_p}{W_{K_3} - W_p} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{K_3} - W_p}{W_{K_4} - W_p} + \frac{1}{\chi_4} \lg \frac{W_{K_4} - W_p}{W_K - W_p}) \quad (2)$$

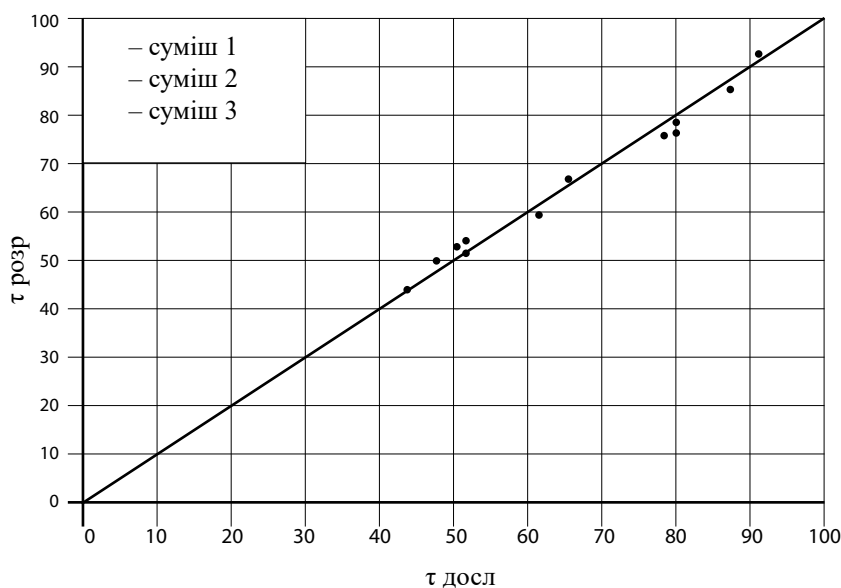


Рис. 6. Співставлення дослідної та розрахункової тривалості сушіння

У формулі (2) величини критичних вологовмістом  $W_{K1}, W_{K2}, W_{K3}, W_{K4}, W_K$  та відносних коефіцієнтів  $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4$  знаходяться безпосередньо з узагальненої кривої сушки в напівлогарифмічних координатах (рис. 5).

Загальна тривалість сушіння визначена для всіх сумішей визначається за формулами (3), (4), (5):

$$\text{Суміш №1 } \tau = \frac{640}{N} \quad (3)$$

$$\text{Суміш №2 } \tau = \frac{442}{N} \quad (4)$$

$$\text{Суміш №3 } \tau = \frac{349}{N} \quad (5)$$

На рис. 6 приведено зіставлення дослідної  $\tau_{\text{дос}}$  і розрахункової  $\tau_{\text{роз}}$  тривалості сушіння функціональної сировини. Похибка дослідної від розрахункової не перевищує 5 %.

Досліджено кінетику теплообміну з визначенням питомої густини теплового потоку та числа Ребіндера. Зменшення вологості матеріалу зменшує питому густину теплового потоку від 1,4 – 1,8 до 0,05 – 0,07 Вт/м<sup>2</sup> (рис. 7).

Характеристикою кінетики процесу сушіння є число Ребіндера (Rb), що визначає відношення кількості теплоти, витраченої на нагрівання матеріалу та на випаровування значної вологи за нескінченно малий проміжок часу:

$$Rb = b \frac{\bar{c}}{r} = \frac{\bar{c}}{r} \left( \frac{dt}{dW} \right) \quad (6)$$

З рис. 8 видно, що число Rb залежить від температури теплоносія та вологовмісту на прикладі суміші №1. На початку процесу сушіння до точки K1 відбувається прогрівання матеріалу зі зменшенням його вологовмісту, при цьому число Rb зменшується.

На ділянці K1 – K2 число Rb мінімальне. В цей час більша частина теплоти витрачається на видалення вологи з матеріалу. Після точки K2 число Rb різко збільшується, а значить більша частина теплоти витрачається на нагрівання матеріалу. Характер зміни числа Rb доводить ефективність впровадження ступеневих режимів сушіння.

Зменшення числа Rb на ділянці K3 – K4 при досягненні матеріалом вологовмісту 40 – 20 %, свідчить про те, що матеріал майже повністю прогрітий, і теплота витрачається на видалення залишкової вологи.

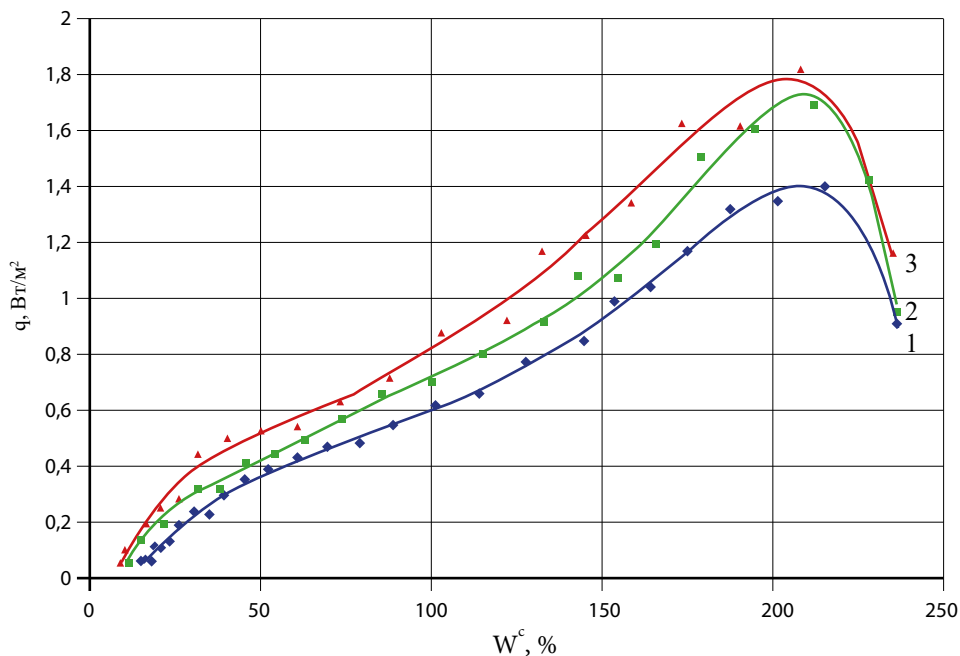


Рис. 7. Зміна теплового потоку від температури у суміші при  $V = 3,5$  м/с,  $\delta = 10$  мм,  $d = 10$  г/кг с.п.: 1 – 60 °C; 2 – 70 °C; 3 – 80 °C

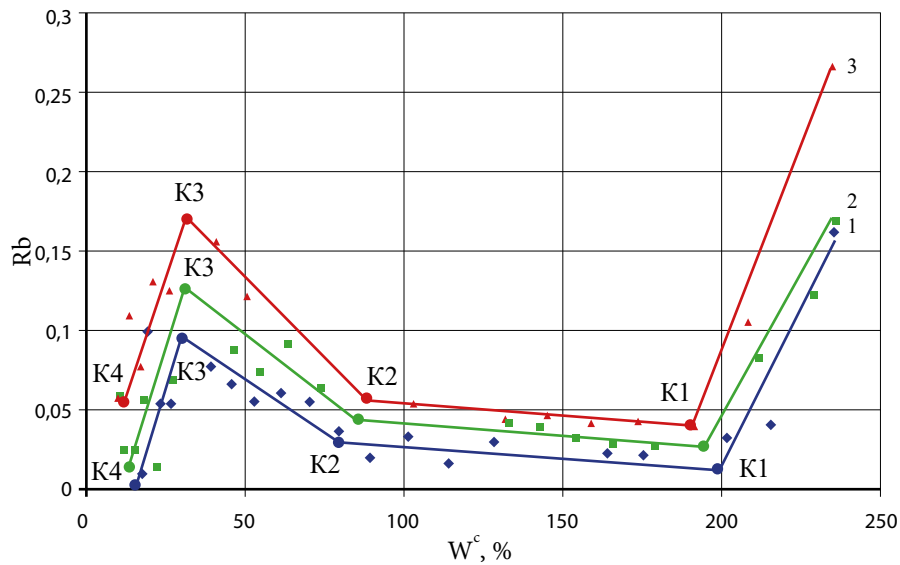


Рис. 8. Зміна числа Ребіндера від температури теплоносія при  $V = 3,5$  м/с,  $\delta = 10$  мм,  $d = 10$  г/кг с. п.:  
1 – 60 °C; 2 – 70 °C; 3 – 80 °C

## Висновки

Проведені експериментальні дослідження підтвердили теоретичне припущення залежності питомої теплоти випаровування води від композиційних складових сировини. Отримані результати дозволяють стверджувати, що при правильно підібраних композиціях вони не лише стабілізують компоненти нативної сировини, а й відбувається інтенсифікація процесу сушіння із зменшенням енерговитрат на процес.

Розроблені енергоефективні ступеневі режими сушіння в яких витрати енергії на кг випареної вологи в 2 рази менше ніж в існуючих одноступеневих режимах.

## References

1. Снежкін, Ю.Ф., Боряк, Л.А., Хавин, А.А. Энергосберегающие теплотехнологии производства пищевых порошков из вторичных сырьевых ресурсов. – Киев: изд. «Наукова думка». – 2004. – 121 с.
2. Лыков, А.В. Теория сушки. – М.: Энергия. – 1968. – 318 с.
3. Шапарь, Р.А. Энергосберегающая технология производства сушеной продукции из растительных материалов. – Одеса: Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2008. – Вып.34, № 2. – С. 84 - 87.
4. Zhanna Petrova, Yury Snezhkin, Kateryna Getmanuyuk, Nataliya Dmytrenko, Mykola Vorontsov. Intensifying Drying Process with Creation of Functional Plant Compositions. – К.: Ukrainian Food Journal. – Volume 3, Issue 2. – 2014. – P. 167 - 174.
5. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М. Энергоефективні теплотехнології виробництва функціональних харчових порошків. – Вінниця: ВНАУ. – 2016. – 21 с.