

## Heat pump technologies of low temperature drying of capillary-porous materials spherical shape

Yu.F. Snezhkin, V.M. Paziuk, Zh.O. Petrova

*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 30.07.2020, revised 31.08.2020, accepted 18.09.2020*

*Snezhkin, Yu.F., Pazyuk, V.M., Petrova, Zh.O. (2020) Heat pump technologies of low temperature drying of capillary-porous materials spherical shape, 3(48), doi: 10.26909/csl.3.2020.1*

Heat pump technologies have become widely used in space heating and air conditioning systems, and the heat pump can be used for low-temperature drying of capillary-porous materials.

Recuperative and condensing heat pumps, which allow both drying and cooling of the material, have become the most widespread.

The developed condensing heat pump drying unit with a mine chamber implements a low-temperature drying process of spherical capillary-porous materials at a drying agent temperature of 40 - 50 °C with a decrease in material humidity by 11 % to a final humidity of 8 %.

Experimental studies on a heat pump drying unit for drying capillary-porous materials of spherical shape indicated a significant reduction in average energy costs per process up to 3700 - 4100 kJ/kg of evaporated moisture. The increase in energy consumption increases significantly in the second part of the second period, where heat consumption can reach 5000 - 5350 kJ/kg of evaporated moisture.

The use of condensing heat pumps for low-temperature drying of capillary-porous materials has shown high energy efficiency compared to existing drying technologies.

Key words: capillary-porous materials, drying kinetics, heat pump technologies, regression equation, multivariate experiment.

## Теплонасосні технології низькотемпературного сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми

Ю.Ф. Снежкін, В.М. Пазюк, Ж.О. Петрова

*Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна*

Теплонасосні технології набули широкого використання в системах опалення та кондиціонування приміщень, також тепловий насос можна застосовувати для низькотемпературного сушіння капілярно-пористих матеріалів.

Найбільше розповсюдження набули рекуперативні та конденсаційні теплові насоси, що дають можливість як висушувати, так і охолоджувати матеріал.

Розроблена конденсаційна теплонасосна сушильна установка з шахтною камерою реалізує низькотемпературний процес сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми при температурі сушильного агента 40 - 50 °C із зниженням вологості матеріалу на 11 % до кінцевої вологості 8 %.

Експериментальні дослідження на теплонасосній сушильній установці при сушінні капілярно-пористих матеріалів сферичної форми вказали на суттєве зменшення середніх енергетичних витрат на процес до 3700 - 4100 кДж/кг вип. вологи. Збільшення енергетичних витрат суттєво збільшується в другій частині другого періоду, де витрати теплоти можуть досягати 5000 - 5350 кДж/кг вип. вологи.

## Вступ

Вибір раціонального способу перетворення первинної енергії (споживання палива) направлений на збільшення віддачі енергії кінцевому споживачу. Основним узагальнюючим критерієм ефективності є коефіцієнт використання первинної енергії палива. Він визначається як відношення корисної теплоти до теплотворної здатності витраченого палива [1] (табл. 1).

Таблиця 1.  
Коефіцієнт використання первинної енергії палива

Вид палива	Коефіцієнт використання
Електропідігрівання	0,27 - 0,35
Спалювання палива в теплогенераторі	0,75 - 0,95
Парокомпресійний тепловий насос з електроприводом	0,6 - 1,35
Парокомпресійний тепловий насос з тепловим двигуном	1,37 - 2,3

Співставлення альтернативних варіантів нагріву теплоносія за ступенем використання первинної енергії показує, що найменш енергоефективним є прямий електричний нагрів ( $K_{ЕЛ} = 0,27 - 0,35$ ), тому що на тепловій електростанції при виробленні електричної енергії на транспортування мережами втрачається в середньому 70 % первинної енергії.

Нагрів теплоносія в теплогенераторі шляхом прямого спалювання палива в котельні призводить до втрат в середньому біля 15 % первинної енергії. Значне коливання коефіцієнту первинної енергії залежить від конструкції теплогенератора і виду палива.

Для парокомпресійних теплових насосів з електроприводом коефіцієнт використання первинної енергії ( $K_{ТН}$ ) дорівнює добутку коефіцієнта перетворення теплового насосу  $\mu$  і коефіцієнта використання первинної енергії при виробленні електроенергії ( $K_{ЕЛ}$ )

$$K_{ТН} = \mu \cdot K_{ЕЛ} \quad (1)$$

Коефіцієнт перетворення теплового насосу  $\mu$  залежить від різниці необхідної температури теплоносія і температури холодного джерела, термодинамічних властивостей робочої речовини і особливостей термодинамічного циклу та технічної досконалості конструкції.

В залежності від схеми підключення теплового насосу в циркуляційний контур, сушарки можна поділити на рекуперативні та конденсаційні.

## Матеріали та методи дослідження

Основний вплив на кінетику процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів має температура та швидкість сушіння, а також початкова вологість матеріалу.

Рекуперативна сушарка 1 з тепловим насосом складається з випарника 2, який встановлюється в вихідному патрубку, та з конденсатора 3 на вхідному патрубку (рис. 1).

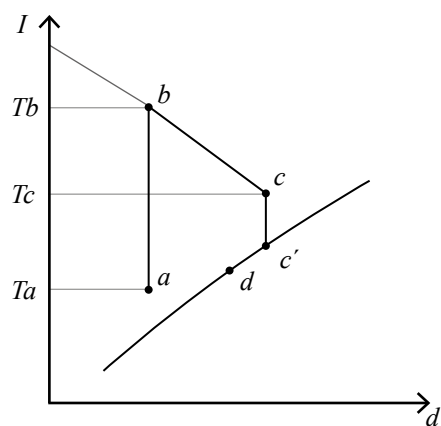
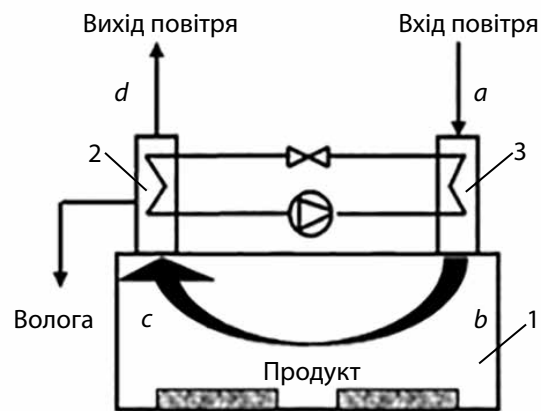


Рис. 1. Схема рекуперативної сушарки з тепловим насосом:

1 – сушарка; 2 – випарник; 3 – конденсатор

Процес сушіння в  $I - d$  діаграмі показаний на рис. 1. Повітря через вхідний патрубок надходить на конденсатор 3 теплового насоса і підігрівается (лінія нагрівання  $a - b$ ). Потім надходить в сушильну камеру 1, де відбувається сушіння продукту (лінія  $b - c$ ) з зменшенням температури та збільшенням вологості теплоносія на виході з сушарки (лінія  $c - c'$ ).

Теплоносій на виході з сушарки охолоджується та зневоднюється на випарнику 2 (лінія  $c' - d$ ) з відбором теплоти на нагрівання в конденсаторі 3 через цикл теплового насосу.

Конденсаційна сушарка з тепловим насосом – замкнутий циркуляційний контур, в якому теплоносій циркулює через випарник 2, конденсатор 3 і продукт, що висушується (рис. 2).

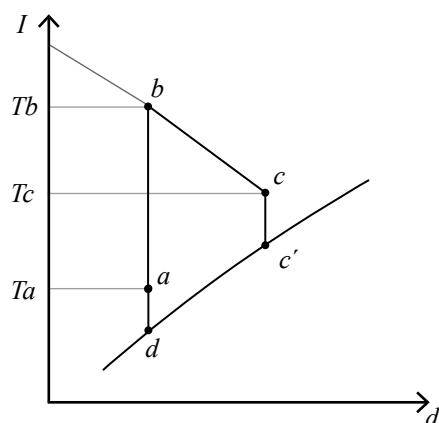
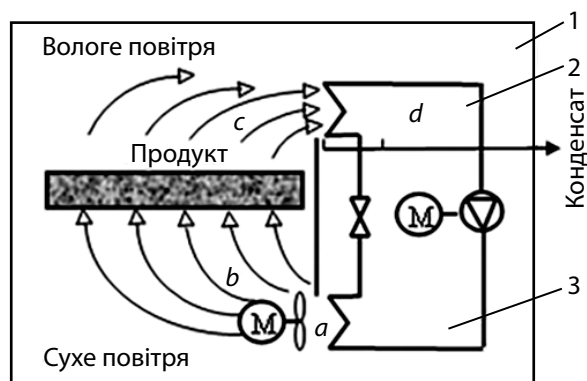


Рис. 2. Схема конденсаційної сушарки з тепловим насосом:

1 – сушарка; 2 – випарник; 3 – конденсатор.

Зволоження та охолодження теплоносія відбувається на випарнику 2 теплового насосу і через цикл теплового насосу зневоднений теплоносій підігрівається на конденсаторі 3.

Більш детально процес сушіння капілярно-пористих матеріалів представлений в  $I - d$  діаграмі. Теплоносій надходить на сушарку, прогрівається (лінія  $a - b$ ). За допомогою вентилятора потік підігрітого повітря направляється на сушіння продукту (лінія  $b - c$ ). Теплоносій на виході з сушарки охолоджується та зневоднюється на випарнику 2 (лінія  $c' - d$ ) з відбором теплоти на нагрівання в конденсаторі 3 через цикл теплового насосу з рециркуляцією теплоносія.

Для дослідження процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми була застосована вдосконалена схема конденсаційної сушарки з тепловим насосом (рис. 3).

Вдосконалена схема конденсаційної сушарки передбачає додаткове встановлення регенеративного теплообмінника 3 та встановлення додаткового вентилятора 6 для стабільної роботи компресора 1 (рис. 3).

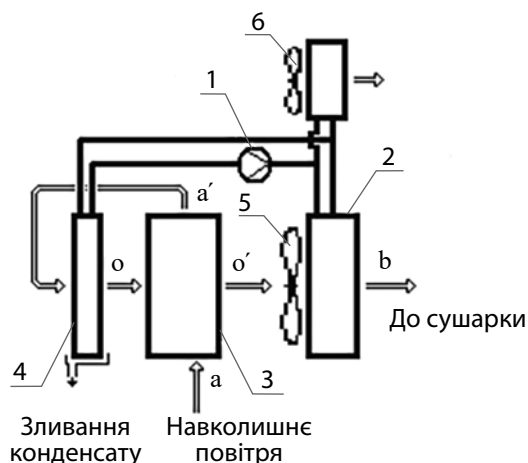


Рис. 3. Вдосконалена схема роботи конденсаційної сушарки із тепловим насосом для сушіння капілярно-пористих матеріалів:  
1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – регенеративний теплообмінник; 4 – випарник; 5, 6 – відповідно, основний і допоміжний вентилятори.  
 $a - a'$  – охолодження повітря в регенеративному теплообміннику;  
 $a' - o$  – зневоднення підігрітого теплоносія в конденсаторі теплового насосу;  
 $o - o'$  – часткове відновлення температури повітря;  
 $o' - b$  – нагрівання теплоносія в конденсаторі

Повітря циркулюючим вентилятором з оточуючого середовища всмоктується на вхід до регенеративного теплообмінника 3 ( $a - a'$ ), частково підігрівається і направляється до випарника 4, де осушується за рахунок охолодження нижче температури роси, а скраплена волога відводиться до збірника конденсату ( $a' - o$ ).

Зневоднене повітря прямує до регенеративного теплообмінника 3, частково відновлює свій температурний потенціал ( $o - o'$ ) і направляється до конденсатора 2, де нагрівається до заданої температури ( $o' - b$ ). Нагріте зневоднене повітря через повітропровід поступає до сушильної камери, де вступає в тепломасообмінний контакт з матеріалом. Проходячи крізь шар вологого матеріалу, гаряче сухе повітря забирає зайву вологу і викидається в зовнішнє середовище.

Експериментальна установка складається з теплонасосного агрегату 1, шахти 5 та контрольно-вимірвальних приладів, регулятора швидкості 6, лічильника електроенергії 7, напільних терезів 8 з цифровим табло 11 (рис. 4).

### Результати та їх обговорення

Результати проведених досліджень впливу температури на кінетику процесу сушіння в експериментальній установці із тепловим насосом показали, що збільшення температури на 10 °С (40 - 50 °С) зменшує тривалість сушіння на 12 % (рис. 5).

Отримані експериментальні дані зміни вологості капілярно-пористого матеріалу від часу сушіння описані за допомогою поліномів 2 ступеня при достовірності апроксимації  $R^2 = 0,999$ .

Для температури теплоносія 40 °С:

$$W_{40} = 0,0008\tau^2 - 0,1969\tau + 19,325. \quad (2)$$

Для температури теплоносія 50 °С:

$$W_{50} = 0,0006\tau^2 - 0,1783\tau + 19,359. \quad (3)$$

Процес низькотемпературного сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми на експериментальній установці із тепловим насосом проходить в три етапи: прогрівання, період постійної та період спадаючої швидкості сушіння (рис. 6).

Максимальна швидкість сушіння при температурі теплоносія 50 °С в точці  $K_1$  становить 0,181 %/хв., а при температурі 40 °С – 0,155 %/хв. В періоді падаючої швидкості сушіння спостерігається друга критична точка  $K_2$  при вологості 11,5 - 12 %.

Визначення питомих витрат теплоти в процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми при різній температурі теплоносія приведені на рис. 7. Спостерігається загальна тенденція у наведеній залежності питомих витрат теплоти від параметрів сушіння: на початку процесу витрати

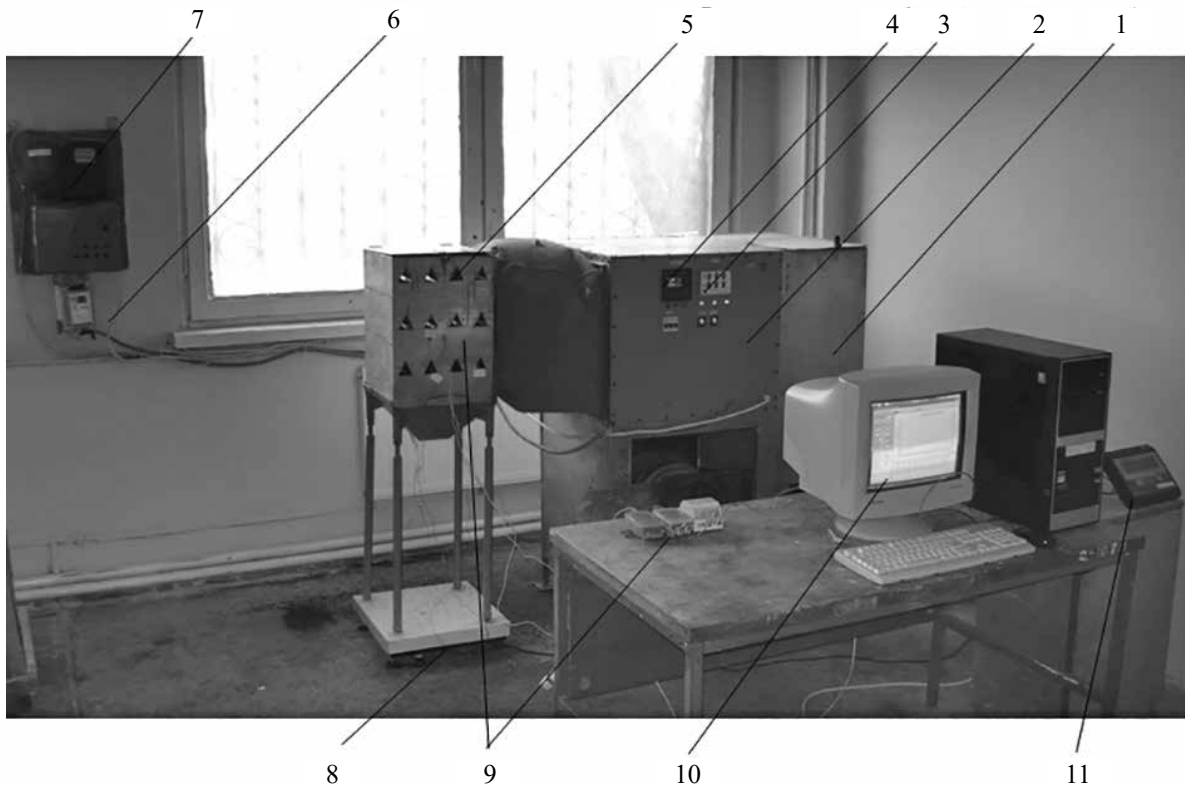


Рис. 4. Експериментальна установка із тепловим насосом для низькотемпературного сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми:  
1 – теплонасосний агрегат; 2 – щит керування; 3 – реле часу; 4 – термореле; 5 – сушильна шахта;  
6 – регулятор швидкості; 7 – лічильник електроенергії; 8 – терези;  
9 – аналоговий цифровий перетворювач *i-7018*, конвертор-інтерфейс *i-7520*  
та хромель-копелеві термоелектричні перетворювачі; 10 – комп'ютер; 11 – цифрове табло терезів

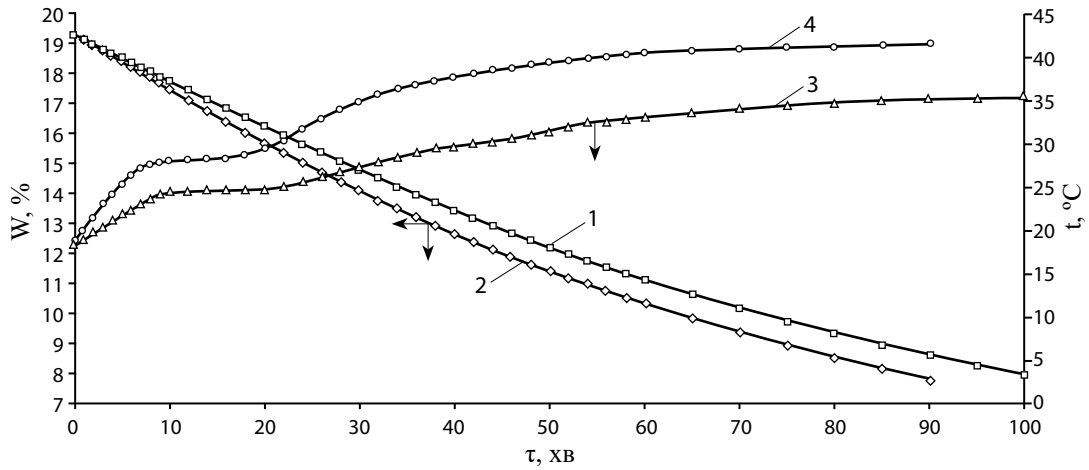


Рис. 5. Вплив температури теплоносія на тривалість низькотемпературного сушіння капілярно-пористих матеріалів при різній температурі теплоносія:  $V = 1,5$  м/с,  $\delta = 40$  мм,  $W_n = 19,2\%$ ,  $d = 6$  г/кг с. п., 1, 3 – 40 °С; 2, 4 – 50 °С.

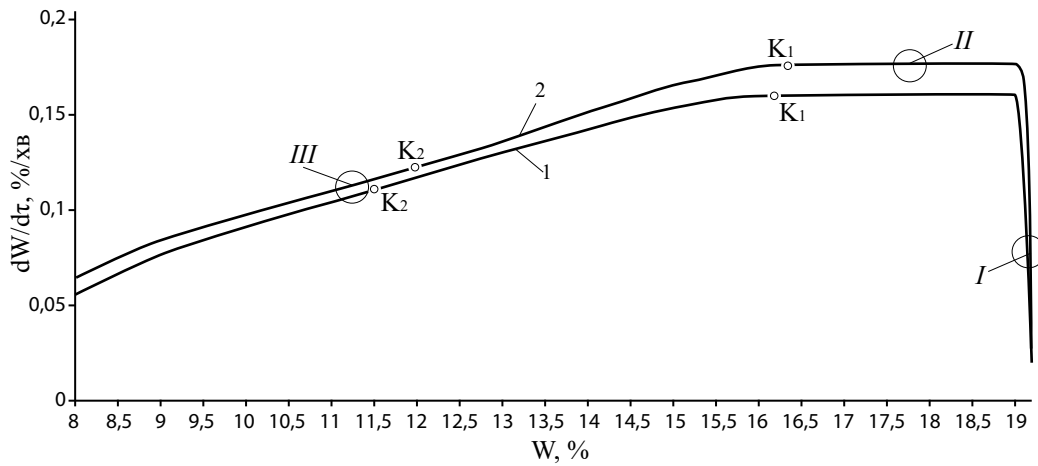


Рис. 6. Криві швидкості сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми при різній температурі теплоносія:  $V = 1,5$  м/с,  $\delta = 40$  мм,  $W_n = 19,2\%$ ,  $d = 6$  г/кг с. п., 1 – 40 °С; 2 – 50 °С.

Періоди: I – прогрівання; II, III – постійної та спадаючої швидкості сушіння

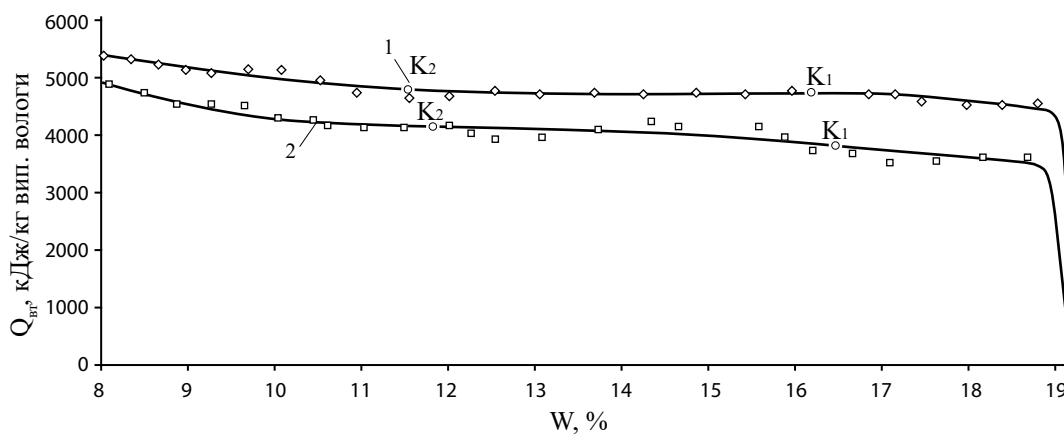


Рис. 7. Питомі витрати теплоти при сушінні капілярно-пористих матеріалів сферичної форми при різній температурі теплоносія:  $V = 1,5$  м/с,  $\delta = 40$  мм,  $W_n = 19,2\%$ ,  $d = 6$  г/кг с. п., 1 – 40 °С; 2 – 50 °С

теплоти мінімальні і складають 4100 - 4800 кДж/кг, поступове збільшення втрат відбувається до вологості 11,5 - 12 %, що відповідає критичній точці  $K_2$ , і свідчить про ефективність процесу сушіння на рівні 4100 - 4900 кДж/кг вип. вологи.

Після цього питомі витрати різко збільшуються і при вологості матеріалу 8 % становлять від 5000 - 5350 кДж/кг вип. вологи, що є досить високими. Видалення 2 - 3 % в самому кінці сушіння насіння ріпаку збільшує енергетичні витрати на 6 - 12 % від середніх питомих витрат на процес.

Для порівняння ефективності застосування теплових насосів при сушінні капілярно-пористих матеріалів сферичної форми були проведені додаткові дослідження із сушінням на електричному теплогенераторі (рис. 8).

Середні питомі витрати теплоти в тепловому насосі в 3,97 раз менше ніж при нагріванні електронагрівом при сушінні з температурою теплоносія 50 °С.

Використання теплових насосів аргументовано їхньою енергоефективністю і можливістю їх засто-

сування при низькотемпературному сушінні капілярно-пористих матеріалів сферичної форми.

## Висновки

Використання конденсаційних теплових насосів для низькотемпературного сушіння капілярно-пористих матеріалів показало високу енергоефективність в порівнянні з існуючими технологіями сушіння.

При збільшенні температури теплоносія від 40 до 50 °С тривалість сушіння зменшується на 12 хв. Процес сушіння проходить в 3 періоди: прогрівання, періоди постійної та падаючої швидкості сушіння. До критичної точки  $K_2$  при вологості матеріалу 11,5 % питомі витрати енергії складають 4100 - 4800 кДж/кг, інтенсивність процесу різко знижується, енерговитрати збільшуються.

## References

1. Теплові насоси в системі теплохолодопостачання. Ю.Ф. Снежкін, Д.М. Чалаєв, В.С. Шаврин, Н.О. Дабіжа. – К.: ТОВ «Поліграф – Сервіс». – 2008. – 104 с.

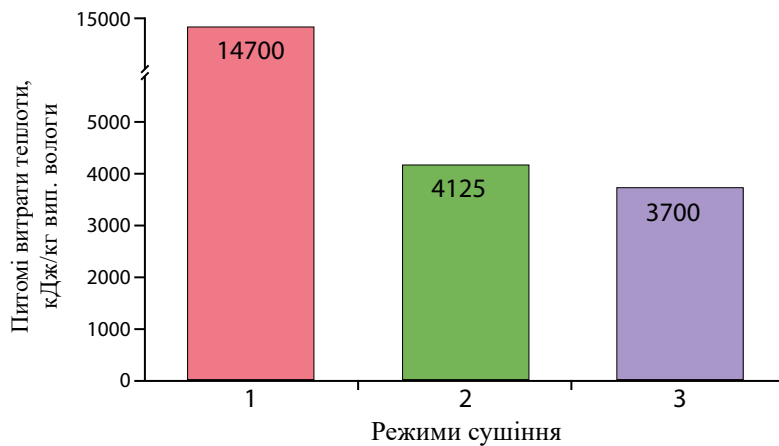


Рис. 8. Середні питомі витрати теплоти від режиму сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми та способу підготовки теплоносія:

з електронагрівом: 1 –  $t = 50$  °С,  $V = 1,5$  м/с,  $\delta = 40$  мм,  $d = 10$  г/кг с. п.;

з тепловим насосом: 2 –  $t = 40$  °С,  $V = 1,5$  м/с,  $\delta = 40$  мм,  $d = 6$  г/кг с. п.;

3 –  $t = 50$  °С,  $V = 1,5$  м/с,  $\delta = 40$  мм,  $d = 6$  г/кг с. п