

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 664.854

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПАРАМЕТРІВ  
СУШІННЯ КУЛЬТИВОВАНИХ ГРИБІВ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ  
ЕНЕРГОПІДВЕДЕННЯ  
DEFINITION OF BASIC PARAMETERS DRYING HEAT AND MASS CULTIVATED  
MUSHROOMS AT DIFFERENT WAYS ENERGY WRAP

Дубковецький І.В., канд. техн. наук, доцент, Малезжик І.Ф., д-р техн. наук, професор,  
Бурлака Т.В., аспірант

Національний університет харчових технологій, м. Київ

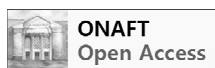
Dubkovetskyi I.V., Malezhyk I.F., Burlaka T.V.

National University of Food Technology, Kyiv, Ukraine

Copyright © 2016 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Зараз існує велика потреба в зневоднених продуктах тривалого зберігання, у першу чергу з рослинної сировини. Сушіння грибів є однією з найважливіших стадій технологічного процесу виробництва харчових концентратів. Від режиму сушіння грибів залежить харчова цінність і якісні показники готової продукції, що є результатом структурно-механічних, біологічних та фізико-хімічних перетворень речовин. Для ефективної реалізації процесу сушіння грибів необхідно вивчити характер зв'язку вологи з визначенням ділянок, на яких здійснюється перетворення речовин при підвищенні температури. Не менш нагальною стоїть проблема економії електроенергії в будь-яких її аспектах, зокрема під час сушіння харчових продуктів в промисловості, де виробництво готової продукції передбачає значні витрати електроенергії. Механізм та інтенсивність перенесення вологи у матеріалі залежать від форми зв'язку вологи з матеріалом, дифузії парогазового середовища через капілярно-порову структуру матеріалу. В роботі висвітлені фактори, які впливають на якісні і кількісні характеристики сушіння культивованих грибів при різних способах енергопідведення

Now there is a great need for long-term storage of dehydrated products, primarily from vegetable raw materials. Drying mushrooms is one of the most important stages of the production process of food concentrates. From the mode of drying mushrooms depends on the nutritional value and quality indicators of the finished product is the result of structural and mechanical, biological and physico-chemical transformations of substances. For effective implementation of the process of drying mushrooms is necessary to examine the nature of moisture due to the definition of the sites on which the transformation of substances at higher temperatures. No less urgent is the problem of energy saving in all its aspects, in particular during the drying of food products in the industry, where the production of the finished product provides a significant cost of electricity. The mechanism and rate of moisture transport in the material depend on the form of moisture due to material vapor medium diffusion through capillary-porous material. The paper highlights the factors that affect the quality and quantity of dried cultivated mushrooms at various ways energy wrap.

**Ключові слова:** сушіння, гриби, радіаційно-конвективний спосіб, опромінення, енерговитрати, інфрачервоне сушіння.

**Keywords:** dryng, mushrooms, radiative-convection method, irradiation, power inputs, infrared drying.

Існує досить багато способів сушіння, які широко застосовуються на харчових підприємствах України. При конвективному сушінні повітря є носієм теплоти від електрокалорифера до продукту, що є більш енерговитратним ніж при терморадіаційному способі, при якому повітря не виконує функцію носія теплоти, а лише функцію відведення вологи. Недоліком інфрачервоного сушіння є те, що енергія поглинається в основному поверхнею матеріалу, частина якої віддається від поверхні матеріалу навколишньому повітрю. Компенсацію даної енергії необхідно здійснювати додатковим опроміненням, що призводить до деформації, короблення і розтріскування продукту. Інфрачервоне опромінення створює градієнт температур, спрямований всередину нарізаного шматочка продукту, що перешкоджає масопереносу, тобто погіршує умови переміщення вологи з внутрішніх шарів до зовнішніх. [2, 4, 5].

## ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Метою даної роботи є розроблення технологічного процесу і обладнання для виробництва сушених продуктів за допомогою різних методів сушіння і їх комбінації.

Нами була сконструйована інноваційна дослідна установка, яка дозволяє застосовувати конвективний, кондуктивний і терморадіаційний способи сушіння як окремо, так і їх поєднанням [1, 3]. Визначення основних тепломасообмінних параметрів здійснювали на прикладі сушіння культивованих грибів при наступних умовах:

- температура теплоносія - 40 – 70 °C;
- питоме навантаження – 4,4 кг/м<sup>2</sup>;
- величина опромінення інфрачервоними ТЕНами –  $E = 8 \text{ кВт/м}^2$ ;
- довжина хвиль трубчастих «темних» ІЧ-генераторів – 2,0...4,0 мкм;
- відстань від інфрачервоних ТЕНів до продукту – 12 см;
- швидкість руху теплоносія – 5,5 м/с;
- конвективне підведення теплоти здійснювали від зовнішнього ТЕНу потужністю 1 кВт.

Сушіння один з найбільш поширених процесів, що використовується з метою підвищення продовольчої стабільності, бо як він знижує активність води в продукті, зменшує мікробіологічну активність і зводить до мінімуму фізичні та хімічні зміни в процесі зберігання.

При розгляді моделювання процесу сушіння, як правило, приймають, що на поверхні продукту досягається стан фазової рівноваги. Поверхня продукту оточена плівкою вологи і повітря над ним знаходиться в стані насичення з температурою мокрого термометра.

Кількість теплоти, що витрачається на випаровування вологи при різних температурах теплоносія наведена в табл. 1

**Таблиця 1**

| Температура теплоносія, $t_n$ °C | Температура матеріалу, $t_m$ °C | Кількість теплоти $Q$ , кВт год/кг вих. сировини при сушінні |                   |                               |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------|
|                                  |                                 | конвективному                                                | терморадіаційному | конвективно-терморадіаційному |
| 40                               | 28                              | 5,5                                                          | 4,3               | 3,9                           |
| 50                               | 39                              | 6,5                                                          | 5,75              | 4,95                          |
| 60                               | 50                              | 6,8                                                          | 6,5               | 5,17                          |
| 70                               | 61                              | 7                                                            | 6,8               | 5,25                          |

Зовнішня поверхня кілограма висушеного продукту при умові, що продукт нарізається кубиками 20 мм:

$$F=6a^2 n=6 \cdot 0,02^2 \cdot 1500=0,0024 \cdot 1430=3,6 \text{ м}^2/\text{кг вихідної сировини.}$$

де  $a$  – сторона кубіка, м<sup>2</sup>;  $n$  – кількість кубіків.

Коефіцієнт теплообміну розраховують за формулою  $\alpha = Q/\Delta t_{cp} F$ ,

де  $\Delta t_{cp} = t_n - t_m$ ;

$t_n$  – середньо арифметична температура повітря в сушильній камері;

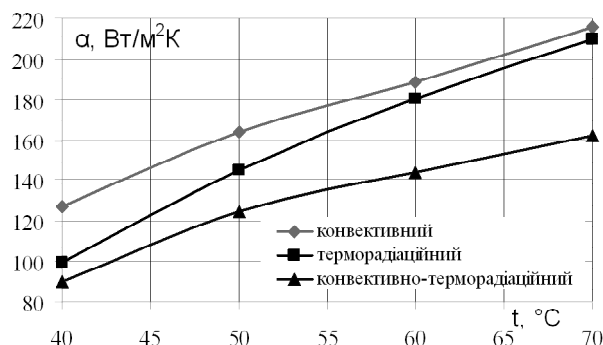
$t_m$  – температура матеріалу (в першому періоді сушіння рівна температурі мокрого термометра) Результати розрахунку наведені в таблиці 2;

**Таблиця 2**

| Температура теплоносія, °C | Коефіцієнт теплообміну $\alpha$ при сушінні |                  |                              |
|----------------------------|---------------------------------------------|------------------|------------------------------|
|                            | конвективний                                | терморадіаційний | конвективно-терморадіаційний |
| 40                         | 127,3                                       | 99,54            | 90,28                        |
| 50                         | 164,14                                      | 145,2            | 125                          |
| 60                         | 188,9                                       | 180,6            | 143,6                        |
| 70                         | 216,05                                      | 209,9            | 162,04                       |

У процесі обробки дослідних даних одержали графік залежності коефіцієнта теплообміну від температури теплоносія при різних методах енергопідведення (рис. 1).

# ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



**Рис. 1 – Залежність коефіцієнтів тепловіддачі при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) від температури теплоносія різними методами енергопідведення**

Апроксимуючи одержані дані коефіцієнтів тепловіддачі при сушінні культивованих грибів (рис. 1), вивели рівняння, що підпорядковуються логарифмічному закону.

Для конвективного енергопідведення –  $\alpha = 156,3 \ln t - 448,75$  при  $R^2 = 0,99$ ;

для терморадіаційного енергопідведення –  $\alpha = 197 \ln t - 627$  при  $R^2 = 0,99$ ;

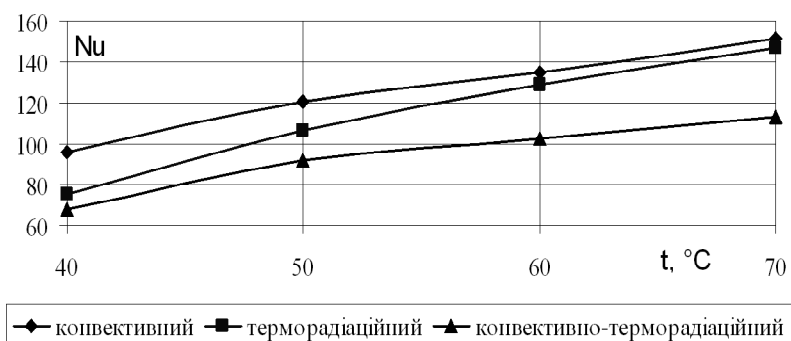
для конвективно-терморадіаційного енергопідведення –  $\alpha = 126,5 \ln t - 374$  при  $R^2 = 0,99$ .

Критерії  $Nu$  і  $Re$  знаходимо за відомими формулами  $Nu = \alpha d / \lambda$ ;  $Re = vd / \nu$ , де  $d$  – визначальний розмір  $d = 4F / \chi = 4a^2 / 4a = a = 0,02$  м. Результати розрахунку наведені в таблиці 3.

**Таблиця 3**

| Температура теплоносія, °C | $Nu_{\text{конв}}$ | $Nu_{\text{іч}}$ | $Nu_{\text{комб}}$ | $\lambda$ , Вт/м К | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $\mu \cdot 10^6$ , Па с | $Re$   |
|----------------------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|--------|
| 40                         | 96,08665           | 75,12229         | 68,13417           | 0,0265             | 1,092                      | 19,221                  | 6249,4 |
| 50                         | 120,6922           | 106,7662         | 91,91176           | 0,0272             | 1,055                      | 19,613                  | 5917   |
| 60                         | 134,8243           | 128,8762         | 102,5061           | 0,02802            | 1,025                      | 20,1                    | 5609,5 |
| 70                         | 151,0835           | 146,7668         | 113,3126           | 0,0286             | 0,996                      | 20,397                  | 5371,4 |

В процесі обробки дослідних даних одержали графік залежності критерія Нусельта від температури теплоносія при різних методах енергопідведення (рис. 2).



**Рис. 2 – Залежність критерія  $Nu$  від температури теплоносія при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) різними методами енергопідведення**

Апроксимуючи дані залежності критерія  $Nu$  від температури при сушінні культивованих грибів (рис. 2), вивели рівняння, що підпорядковуються логарифмічному закону.

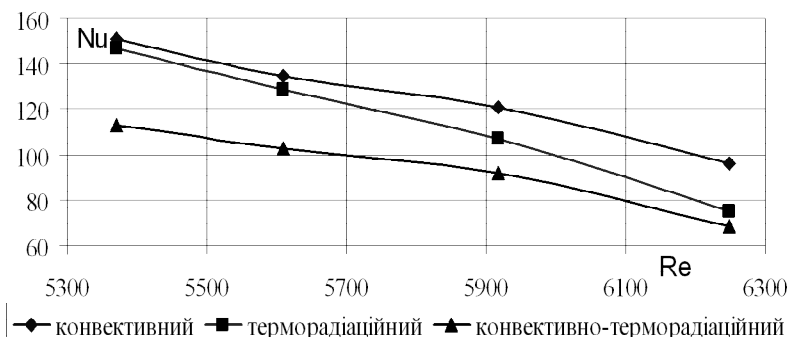
Для конвективного енергопідведення –  $Nu = 96,5 \ln t - 259$  при  $R^2 = 0,99$ ; для терморадіаційного енергопідведення –  $Nu = 127,9 \ln t - 395$  при  $R^2 = 0,99$ ; для конвективно-терморадіаційного енергопідведення –  $Nu = 79,3 \ln t - 222$  при  $R^2 = 0,98$ .

Співставивши значення критерія  $Nu$  і критерія  $Re$  при різних температурах теплоносія одержали залежність  $Nu = f(Re)$  (рис 3).

Апроксимуючи дані залежності критерія  $Nu$  від критерія  $Re$  при сушінні культивованих грибів (рис. 3), вивели рівняння, що підпорядковуються степеневому закону.

# ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Для конвективного енергопідведення –  $Nu = 10^{13} Re^{-2,9}$  при  $R^2 = 0,98$ ; для терморадіаційного енергопідведення –  $Nu = 3 \cdot 10^{18} Re^{-4,36}$  при  $R^2 = 0,97$ ; для конвективно-терморадіаційного енергопідведення –  $Nu = 2 \cdot 10^{14} Re^{-3,25}$  при  $R^2 = 0,93$ .



**Рис. 3 – Залежність критерія Nu різними методами енергопідведення при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) від критерія Re**

Швидкість процесу сушіння залежить від стану навколишнього середовища і умов сушіння, а повний потік вологи виражається через об'ємний коефіцієнт масовіддачі.

$$J = dW^c / dt = \beta(x_r - x) = \beta(x_1 - x),$$

де  $x_r$  – вологовміст повітря (кг/кг) на межі частинки, яка вважається рівноважним;  $x_r = x_1$  – вологовміст повітря при постійній швидкості (перший період) сушіння (кг/кг). Обидві величини знаходимо за психрометричними даними. Молярна маса води  $M_v = 18$ , повітря  $M_n = 29$ , відносна вологість повітря  $\phi = 64$ . Парціальний тиск насиченої пари  $p$  при різних температурах  $t$  знаходимо з таблиць, а мольні долі  $m$  – зі співвідношення  $m_1 = p_{t1} / (1 - p_{t1})$ ,  $p_{t1} = p_t / 760$ . При температурі 21 °C  $p_{t21} = 18,66 / 760 = 0,025$ .

Молярна частка при 21 °C  $m_2 = p_{t21} \phi / (1 - p_{t21}) = 0,016$ . Вологовміст  $x = (M_v / M_n)(m_2 / (1 - m_2)) = 0,01$ . Вологовміст в першому періоді знаходиться за формулою  $x_1 = (M_v / M_n)(m_1 / (1 - m_1))$ .

Результати розрахунків наведені в таблиці 4.

**Таблиця 4**

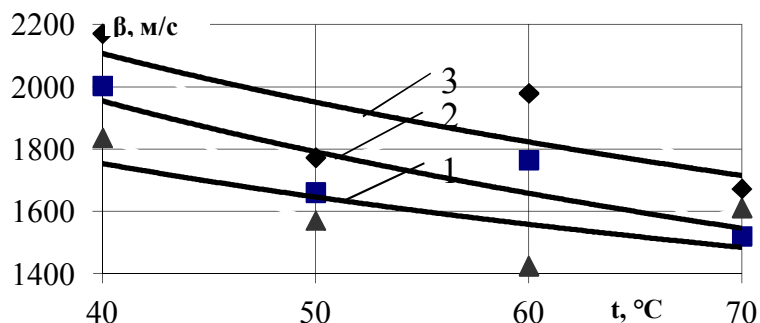
| Температура теплоносія, °C | Парціальний тиск $p_t$ , мм.рт.ст | Парціальний тиск $p_{t1}$ , мм.рт.ст | Молярна частка $m_1$ | Вологовміст $x_1$ , кг/кг |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------|---------------------------|
| 40                         | 18,8                              | 0,025                                | 0,025                | 0,016                     |
| 50                         | 22                                | 0,029                                | 0,03                 | 0,019                     |
| 60                         | 26                                | 0,034                                | 0,035                | 0,023                     |
| 70                         | 30                                | 0,039                                | 0,041                | 0,027                     |

Результати визначення потоку вологи  $J = dW^c / dt$  і коефіцієнта масовіддачі  $\beta = J / (x_1 - x)$  при різній температурі теплоносія наведені в таблиці 5.

**Таблиця 5**

| Температура теплоносія, °C | Потік вологи при сушінні, $J = dW^c / dt$ |                  |                              | Коефіцієнт масовіддачі $\beta$ при сушінні |                   |                               |
|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|-------------------------------|
|                            | конвективний                              | терморадіаційний | конвективно-терморадіаційний | конвективному                              | терморадіаційному | конвективно-терморадіаційному |
| 40                         | 13                                        | 11               | 12                           | 1836                                       | 2003              | 2170                          |
| 50                         | 15,8                                      | 14               | 14,8                         | 1571                                       | 1661              | 1773                          |
| 60                         | 25                                        | 18               | 22,3                         | 1425                                       | 1765              | 1979                          |
| 70                         | 27,5                                      | 26,5             | 25                           | 1612                                       | 1521              | 673                           |

При обробці дослідних даних за потоком вологи і різниці вологовмістів на поверхні продукту і всередині теплоносія одержали графік залежності коефіцієнта масообміну від температури теплоносія за різними методами енергопідведення (рис. 4).

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**


**Рис. 4 – Залежність коефіцієнтів масовіддачі від температури теплоносія при сушінні культивованих грибів Глива різними методами енергопідведення: 1 – конвективний, 2 – терморадіаційний, 3 – конвективно-терморадіаційний**

Апроксимуючи одержані дані коефіцієнтів масовіддачі при сушінні культивованих грибів, вивели рівняння, що підпорядковуються логарифмічному закону.

Для конвективного енергопідведення  $\beta = -699 \ln t + 4684$  при  $R^2 = 0,88$ ;

для терморадіаційного енергопідведення  $\beta = -729 \ln t + 4642$  при  $R^2 = 0,95$ ;

для конвективно-терморадіаційного енергопідведення  $\beta = -480 \ln t + 3526$  при  $R^2 = 0,86$ .

Критерій Шервуда  $Sh = \beta d/D$ , а критерій Шмідта  $Sc = \mu/(\rho D)$ ;

де  $d = 0,02$  м – визначальний розмір;

$D$  – коефіцієнт дифузії для парогазової суміші,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

$D$  знаходимо за формулою  $D = D_{20} \cdot (273 + T/273)^{3/2}$ ,

де  $D_{20} = 21,9 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – коефіцієнт дифузії водяної пари у повітрі при  $20^\circ\text{C}$

$T$  – середня абсолютна температура в примежовому шарі, яка знаходиться як середньоарифметична між температурами середовища і поверхнею продукту.

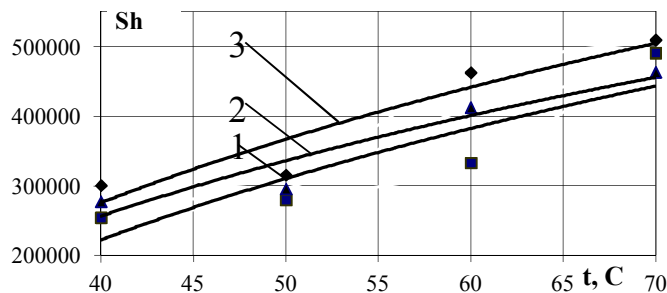
$$T = (t_n + t_m)/2.$$

Результати визначення середньої абсолютної температури в примежовому шарі, коефіцієнта дифузії для парогазової суміші і критерію Шервуда для масообміну при різних температурах теплоносія наведені в таблиці 6.

**Таблиця 6**

| Температура теплоносія $t_n, ^\circ\text{C}$ | $T, ^\circ\text{C}$ | $D \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$ | критерій $Sc$ при сушінні | критерій $Sh$ при сушінні |                   |                               |
|----------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------------|
|                                              |                     |                                      |                           | конвективному             | терморадіаційному | конвективно-терморадіаційному |
| 40                                           | 34                  | 26,11                                | 0,674                     | 254469                    | 277616            | 300762                        |
| 50                                           | 44,5                | 27,47                                | 0,6767                    | 280042                    | 296085            | 316050                        |
| 60                                           | 55                  | 28,84                                | 0,68                      | 333214                    | 412718            | 462758                        |
| 70                                           | 65,5                | 30,24                                | 0,677                     | 491081                    | 463359            | 509664                        |

В процесі обробки дослідних даних одержали графік залежності критерія Нусельта дифузійного від температури теплоносія різними методами енергопідведення (Рис. 5).



**Рис. 5 – Залежність критерія Шервуда при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) від температури теплоносія при різних методах енергопідведення: 1 – конвективний, 2 – терморадіаційний, 3 – конвективно-терморадіаційний**

## ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Апроксимуючи значення критерія Шервуда при сушінні культивованих грибів (рис. 2), вивели рівняння, що підпорядковуються логарифмічному закону.

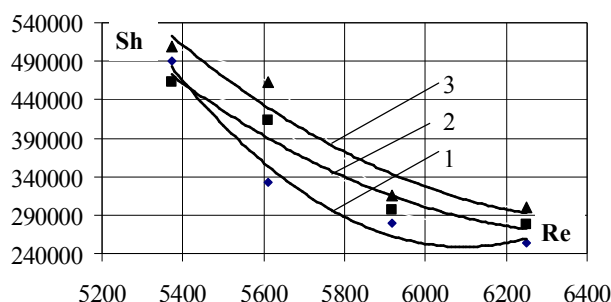
При конвективному енергопідведенні  $Sh = -3,38 \ln t + 15,4$  при  $R^2 = 0,93$ ; при терморадіаційному енергопідведенні  $Sh = -3,8 \ln t + 17,3$  при  $R^2 = 0,98$ ; при конвективно-терморадіаційному енергопідведенні

$$Sh = -4 \ln t + 18,5 \text{ при } R^2 = 0,98.$$

Співставивши значення критерія  $Sh$  і критерія  $Re$  при різних температурах теплоносія одержали залежність  $Sh = f(Re)$  (рис. 6).

Апроксимуючи значення критерія  $Sh$  при сушінні культивованих грибів (рис. 6), вивели рівняння, що підпорядковуються степеневому закону.

При конвективному енергопідведенні  $Sh = 0,448 Re^2 - 5465 Re + 2 \times 10^7$  при  $R^2 = 0,98$ ; для терморадіаційному енергопідведенні  $Sh = 0,18 Re^2 - 2348 Re + 8 \times 10^6$  при  $R^2 = 0,96$ ; при конвективно-терморадіаційному енергопідведенні –  $Sh = 0,2 Re^2 - 2590 Re + 9 \times 10^6$  при  $R^2 = 0,94$ .



**Рис. 6 – Залежність критерія  $Sh$  при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) від критерія  $Re$  при різних методах енергопідведення: 1 – конвективний, 2 – терморадіаційний, 3 – конвективно-терморадіаційний**

**Висновки.** Висушені комбінованим конвективно-терморадіаційним способом культивовані гриби мають найкращі органолептичні (зовнішній вигляд) і фізико-хімічні показники та найнижчі енерговитрати. Одержані критеріальні залежності доцільно рекомендувати при проектуванні і виготовленні сушильного обладнання з різними способами енергопідведення.

### Література

1. Патент на корисну модель 97303 Україна / Радіаційно-конвективна сушильна установка / Дубковецький І.В., Малежик І.Ф., Бурлака Т.В., Стрельченко Л.В.
2. Бурлака Т.В., Дубковецький І.В., Малежик І. Ф. Дослідження сушіння культивованих грибів різними інфрачервоними випромінювачами //ОНАХТ, Наукові праці, 2015, випуск № 47, том 2, ст. 12-18.
3. Патент на корисну модель 97904 Україна / Спосіб сушіння культивованих грибів комбінованим енергопідведенням / Малежик І.Ф., Дубковецький І.В., Бурлака Т.В.
4. Бурлака Т.В., Дубковецький І.В., Малежик І. Ф. Дослідження сушіння культивованих грибів різними інфрачервоними випромінювачами //ОНАХТ, Наукові праці, 2015, випуск № 47, том 2, ст. 12-18.
5. Потапов, В.А. Рационально режимы сушки овощей смешанным теплоотводом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.А. Потапов. - Одесса, 1994. - 16 с.

### References

1. Dubkovetskyi I.V., Malezhyk I.F., Burlaka T.V. Strelchenko L.V. *Radiatsiino-konvektyvna sushylna ustanovka* [Radiative-convection drying apparatus], Patent UA no. 97303.
2. Burlaka T.V., Dubkovetskyi I.V., Malezhyk I. F. (2015), "Research of drying cultured mushrooms by different infrared radiators", *Naukovi pratsi ONAKhT*, Is. № 47, Vol. 2, pp. 12-18.
3. Malezhyk I.F., Dubkovetskyi I.V., Burlaka T.V. *Sposib sushinnia kulytyvovanykh hrybiv kombinovanyim enerhopidvedenniam* [Method of drying cultured mushrooms by combined energy supply], Patent UA, no. 97904.
4. Burlaka T.V., Dubkovetskyi I.V., Malezhyk I. F. (2015), "Research of drying cultured mushrooms by different infrared radiators", *Naukovi pratsi ONAKhT*, Is. № 47, Vol. 2, pp. 12-18.
5. Potapov, V.A. *Ratsionalno rezhimy sushki ovoshchey smeshannym teplootvodom, avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Rational drying regimes of vegetables by combined heat supply, PhD dis.], Odessa, 1994, 16 p.