

**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, Малежик І.Ф. д-р техн. наук, професор  
Національний університет харчових технологій, м. Київ

*Анотація*

*Зараз існує велика потреба в зневоднених продуктах тривалого зберігання, у першу чергу з рослинної сировини. 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.*

*Annotation*

*Today there is a great need for long-term storage of dehydrated products, primarily from vegetable raw materials. No less urgent is the problem of energy savings in all its aspects, in particular during drying food industry, where production of finished products involves significant costs of electricity. Transfer mechanism and intensity of moisture in the material depend on the interconnected complex due process violations moisture from the material vapor diffusion environment through capillary pore structure of the material.*

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

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].

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 °С;
- питома навантаження – 4,4 кг/м<sup>2</sup>;
- величина опромінення інфрачервоними ТЕНами –  $E = 8$  кВт/м<sup>2</sup>;
- 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, $t_n$ °С	Температура матеріалу, $t_m$ °С	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 кубіками 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  $\Delta t_{cp} = t_{п} - t_{м}$ ;

$t_{п}$  – середньо арифметична температура повітря в сушильній камері;

$t_{м}$  – 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).

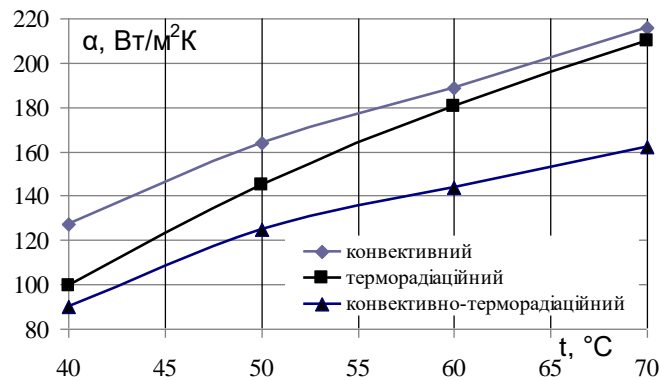


Рис.1. Залежність коефіцієнтів тепловіддачі при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) від температури теплоносія різними методами енергопідведення.

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	$Nu_{конв}$	$Nu_{рад}$	$Nu_{комб}$	$\lambda$ , 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).

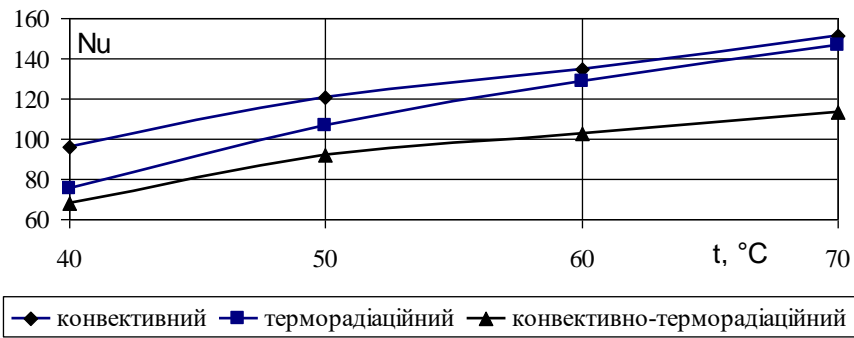


Рис.2. Залежність критерія Nu від температури теплоносія при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) різними методами енергопідведення.

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.

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  $R^2 = 0,93$ .

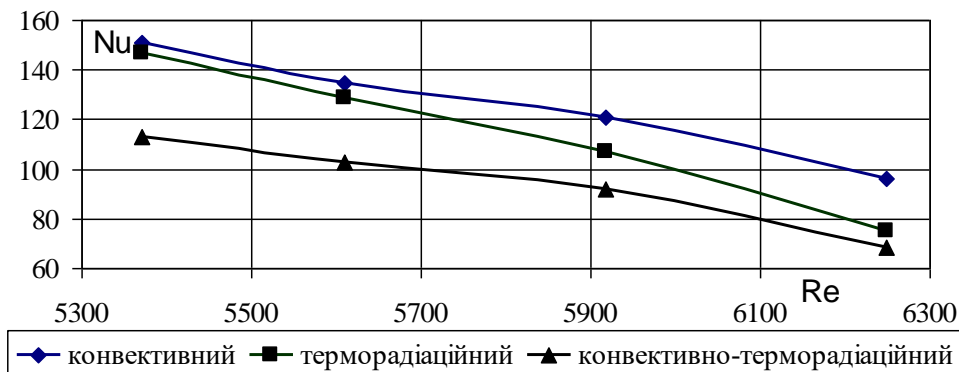


Рис.3. Залежність критерія Nu різними методами енергопідведення при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) від критерія Re.

Швидкість процесу сушіння залежить від стану навколишнього середовища і умов сушіння, а повний потік води 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  $M_b=18$ , повітря  $M_n=29$ , відносна вологість повітря  $\phi = 64$ . Парціальний тиск насиченої пари  $p$  при різних температурах  $t$  знаходимо з таблиць, а мольні доли  $m$  – зі співвідношення  $m_1 = pt_1 / (1 - Pt_1)$ ,  $pt_1 = pt / 760$ . При температурі 21 °C  $pt_{21} = 18,66 / 760 = 0,025$ .

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

Результати розрахунків наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Температура теплоносія, °C	Парціальний тиск $pt$ , мм.рт.ст	Парціальний тиск $pt_1$ , 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 води  $J=dW^c /dt$  і коефіцієнта масовіддачі  $\beta=J/(x_1-x)$  при різних температурах теплоносія наведені в таблиці 5.

Таблиця 5.

Температура теплоносія, °C	Потік води 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	1673

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

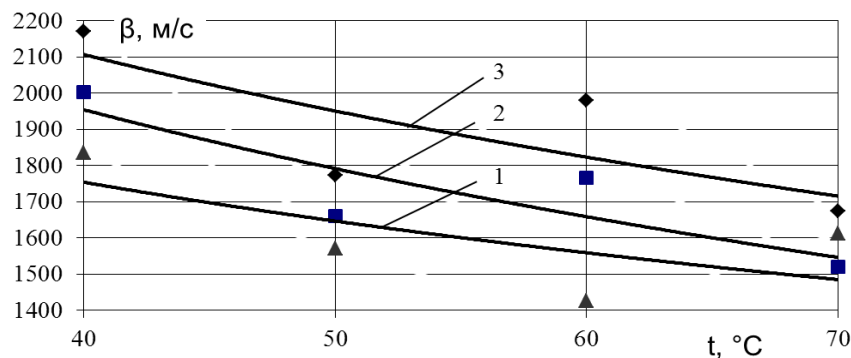


Рис.4. Залежність коефіцієнтів масовіддачі від температури теплоносія при сушінні культивованих грибів Глива різними методами енергопідведення:

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,  $m^2/c$ .

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

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

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

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

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

Таблиця 6.

Температура теплоносія $t_n$ , °C	$T$ , °C	$D \cdot 10^6$ , $m^2/c$	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).

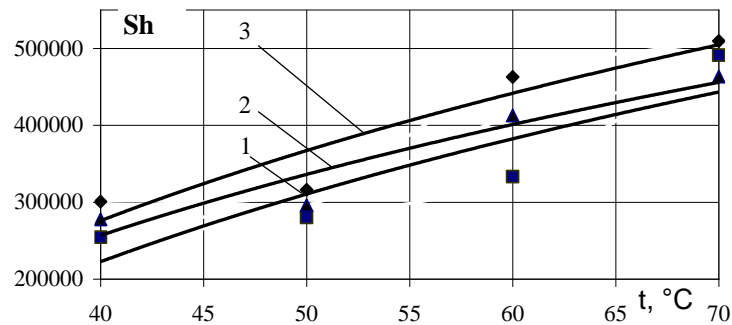


Рис.5. Залежність критерія Шервуда при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) від температури теплоносія при різних методах енергопідведення: 1 – конвективний, 2 – терморадіаційний, 3 – конвективно-терморадіаційний.

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  $Sh = -4\ln t + 18,5$  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  $Sh = 0,448Re^2 - 5465Re + 2 \times 10^7$  при  $R^2 = 0,98$ ; для терморадіаційному енергопідведенні  $Sh = 0,18Re^2 - 2348Re + 8 \times 10^6$  при  $R^2 = 0,96$ ; при конвективно-терморадіаційному енергопідведенні –  $Sh = 0,2Re^2 - 2590Re + 9 \times 10^6$  при  $R^2 = 0,94$ .

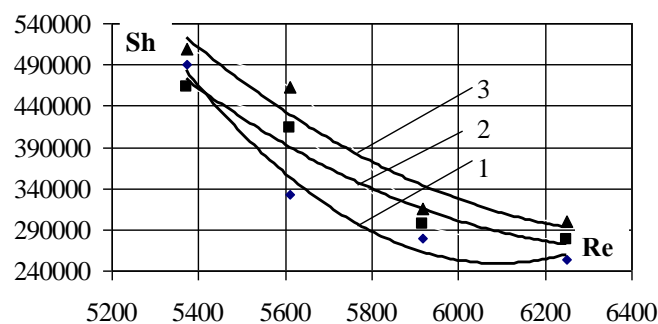


Рис.6. Залежність критерія  $Sh$  при сушінні культивованих грибів Глива (*Pleurotus ostreatus*) від критерія  $Re$  при різних методах енергопідведення: 1 – конвективний, 2 – терморадіаційний, 3 – конвективно-терморадіаційний.

### 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.