

## ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ СУШІННЯ ГРИБІВ ГЛИВИ

Малежик І.Ф., д-р техн. наук, професор, Дубковецький І.В., канд. техн. наук, доцент,  
Бурлака Т.В., аспірант, Стрельченко Л.В., магістрант  
Національний університет харчових технологій, м. Київ

Найбільш ефективним методом консервування харчових продуктів на сьогодні є сушіння. В той же час цей метод є і найдорожчим. Тому головним завданням процесу сушіння є добитися найвищої якості при мінімальних затратах електроенергії. Для зневоднення культивованих грибів з енергетичної точки зору найбільш доцільним є сушіння інфрачервоним випромінюванням, але даний метод не набув значного поширення через явище термодифузії. В статті наведені дослідження кінетики сушіння гливи інфрачервоним, конвективним і комбінованим способами.

The most effective method of food preservation today is dry. However, this method is also the most expensive. Therefore, the main objective of the drying process is to achieve the highest quality at a minimum cost of electricity. For dehydrated cultivated mushrooms from the energy point of view, the most appropriate drying by infrared radiation, but this method has not acquired a significant spread through thermal diffusion phenomenon. The article presents the study of the kinetics of drying oyster infrared, convection and combination methods.

Ключові слова: сушіння, гриби, комбінований метод, опромінення, енергозатрати, інфрачервоне сушіння.

Як відомо, при конвективному висушуванні носієм теплоти є повітря. Нами запропоновано комбінувати два способи підведення теплоти при сушінні – терморадіаційний і конвективний, що дозволить зменшити відносну вологість повітря і збільшити рушійну силу процесу в порівнянні з інфрачервоним сушінням.

Для вирішення даних завдань була спроектована і введена в експлуатацію сушильна установка, яка дозволяє сушити інфрачервоним і конвективним способами як окремо, так і їх поєднанням.

Було досліджено процес сушіння культивованих грибів Глива для порівняння ефективності сушіння комбінованим, конвективним та інфрачервоним методами при температурах 40, 50, 60 і 70°C. Опромінення здійснювалось зверху і знизу продукту трубчастими «темними» ІЧ-генераторами з довжиною хвиль 2,0...4,0 мкм. Величина опроміненості інфрачервоних тенів становила  $E=8$  кВт/м<sup>2</sup>. Відстань від інфрачервоних тенів до продукту становила 15 см. Одночасно з опроміненням здійснювали конвективний підвід теплоти від зовнішнього тону потужністю 1 кВт, з швидкістю руху теплоносія 6 м/с. Гриби розміщували товщиною 8 мм на сітчастому піддоні, який вставляли в сушильну камеру.

Побудовані криві сушіння (рис. 1) характеризують зміну інтегрального вологовмісту  $W$  залежно від часу. З рисунка видно, що із зростанням температури теплоносія тривалість процесу сушіння скорочується на незначну величину для досягнення кінцевої величини вологовмісту  $W^c = 13.63$  % (по кожному способу сушіння).

Тривалість сушіння із зростанням температури теплоносія з 40 до 70 °C зменшується час з 150 до 78 хвилин (конвективний метод), з 128 до 78 хвилин (інфрачервоний метод) і відповідно з 160 до 85 хвилин для комбінованого методу. Період сталої швидкості сушіння спостерігається до першої критичної точки.

Апроксимуючи дані першого періоду сушіння, вивели рівняння, що підпорядковуються лінійному закону, які наведені в таблиці.

Комбінований метод			
40	50	60	70
$w^c = -10.2\tau + 798.57$ при $R^2 = 0,9938$	$w^c = -13.806\tau + 797.72$ при $R^2 = 0,9938$	$w^c = -18.485\tau + 813.2$ при $R^2 = 0,9978$	$w^c = -24.433\tau + 840$ при $R^2 = 0,9958$
Конвективний метод			
$w^c = -11.541\tau + 805.95$ при $R^2 = 0,9946$	$w^c = -13.943\tau + 820.99$ при $R^2 = 0,9962$	$w^c = -18.06\tau + 837.09$ при $R^2 = 0,9861$	$w^c = -15.654\tau + 826.61$ при $R^2 = 0,9945$
Інфрачервоний метод			
$w^c = -9.96\tau + 793.51$ при $R^2 = 0,9938$	$w^c = -15.702\tau + 821.62$ при $R^2 = 0,9983$	$w^c = -20.76\tau + 838.32$ при $R^2 = 0,971$	$w^c = -17.77\tau + 836.68$ при $R^2 = 0,9715$

Апроксимуючи дані другого періоду сушіння, вивели рівняння, що підпорядковуються степеневому закону.

Комбінований метод			
40	50	60	70
$w^c = 1464.9e^{-0.028\tau}$ при $R^2 = 0,988$	$w^c = 2075e^{-0.045\tau}$ при $R^2 = 0,9555$	$w^c = 2025.1e^{-0.056\tau}$ при $R^2 = 0,954$	$w^c = 996.42e^{-0.045\tau}$ при $R^2 = 0,9954$
Конвективний метод			
$w^c = 1250.5e^{-0.027\tau}$ при $R^2 = 0,9815$	$w^c = 1354.8e^{-0.035\tau}$ при $R^2 = 0,9672$	$w^c = 1532.1e^{-0.045\tau}$ при $R^2 = 0,9521$	$w^c = 1515.3e^{-0.053\tau}$ при $R^2 = 0,9734$
Інфрачервоний метод			
$w^c = 2213.7e^{-0.036\tau}$ при $R^2 = 0,9753$	$w^c = 1453.5e^{-0.039\tau}$ при $R^2 = 0,9541$	$w^c = 1335.5e^{-0.045\tau}$ при $R^2 = 0,9607$	$w^c = 1404.6e^{-0.054\tau}$ при $R^2 = 0,9798$

де  $w^c$  – вологовміст, %;  $\tau$  – час, хв;  $R^2$  – середньоквадратичне відхилення.

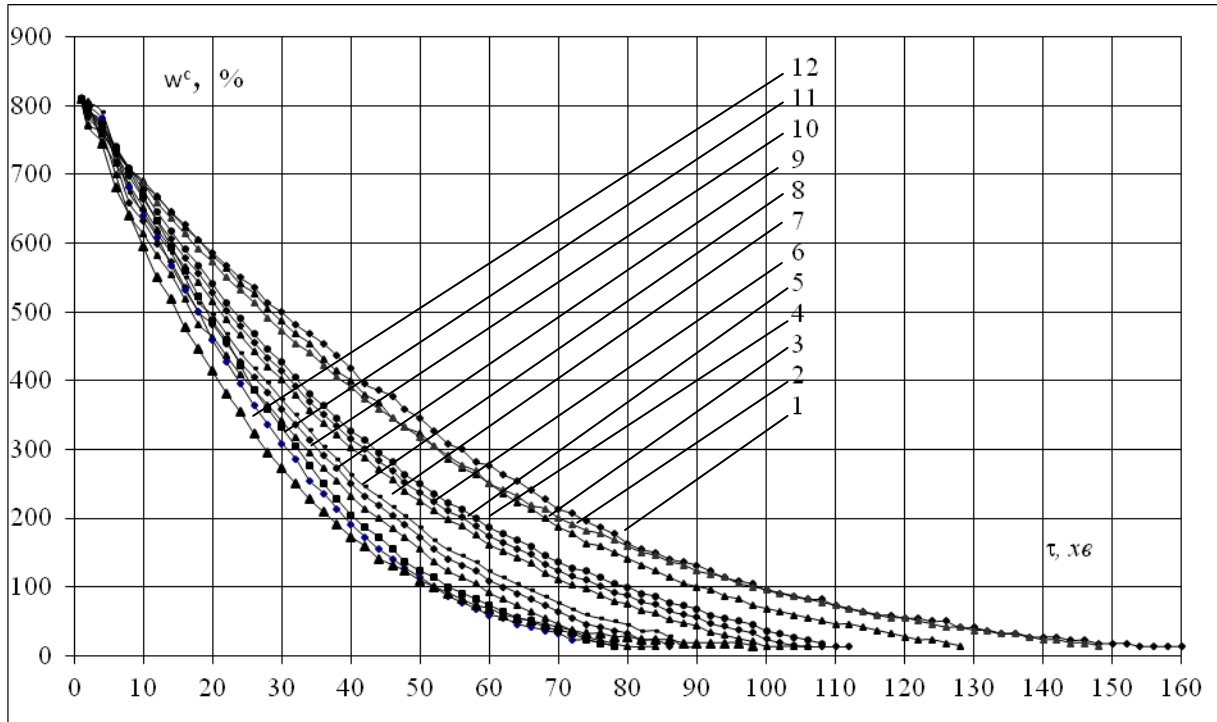


Рис.1. Криві сушіння гливи звичайної:

40 С: 1 – Конвективний метод; 2 – Інфрачервоний метод; 3 – Комбінований метод;  
50 С: 4 – Конвективний метод; 5 – Інфрачервоний метод; 6 – Комбінований метод;  
60 С: 7 – Конвективний метод; 8 – Інфрачервоний метод; 9 – Комбінований метод;  
70 С: 11 – Конвективний метод; 10 – Інфрачервоний метод; 12 – Комбінований метод.

На основі даних по кривих сушіння гливи звичайної культивованої були побудовані криві швидкості періоду для кожного із способів (рис.2).

При виведенні рівняння кінетики сушіння з експериментальних залежностей  $dw^c/d\tau$  встановили, що на першій стадії швидкість сушіння можна приблизно вважати постійною. З підвищенням температури теплоносія вона зростає від 4,86 кг/(кг·хв) (для 60 °С) до 9,6 кг/(кг·хв) (для 80 °С).

Проаналізувавши другий період сушіння вивели апроксимаційні рівняння при температурах:

**40 °С**

Комбінований метод (степенева залежність)  $y = 0,088x^{0,823}$  при  $R^2 = 0,946$

Конвективний (лінійна)  $y = 0,018x + 1,116$  при  $R^2 = 0,98$

Інфрачервоний метод (степенева)  $y = 0,145x^{0,671}$  при  $R^2 = 0,991$

**50 °С**

Комбінований метод (лінійна)  $y = 0,031x + 1,304$  при  $R^2 = 0,984$

Конвективний (лінійна)  $y = 0,020x + 2,118$  при  $R^2 = 0,989$

Інфрачервоний метод (степенева)  $y = 0,411x^{0,543}$  при  $R^2 = 0,954$   
**60 °C**

Комбінований метод (лінійна)  $y = 0,035x + 1,976$  при  $R^2 = 0,961$

Конвективний (лінійна)  $y = 0,024x + 2,976$  при  $R^2 = 0,991$

Інфрачервоний метод (степенева)  $y = 0,177x^{0,743}$  при  $R^2 = 0,992$   
**70 °C**

Комбінований метод (лінійна)  $y = 0,043x + 1,932$  при  $R^2 = 0,995$

Конвективний (степенева)  $y = 0,385x^{0,637}$  при  $R^2 = 0,992$

Інфрачервоний (степенева)  $y = 0,392x^{0,626}$  при  $R^2 = 0,968$

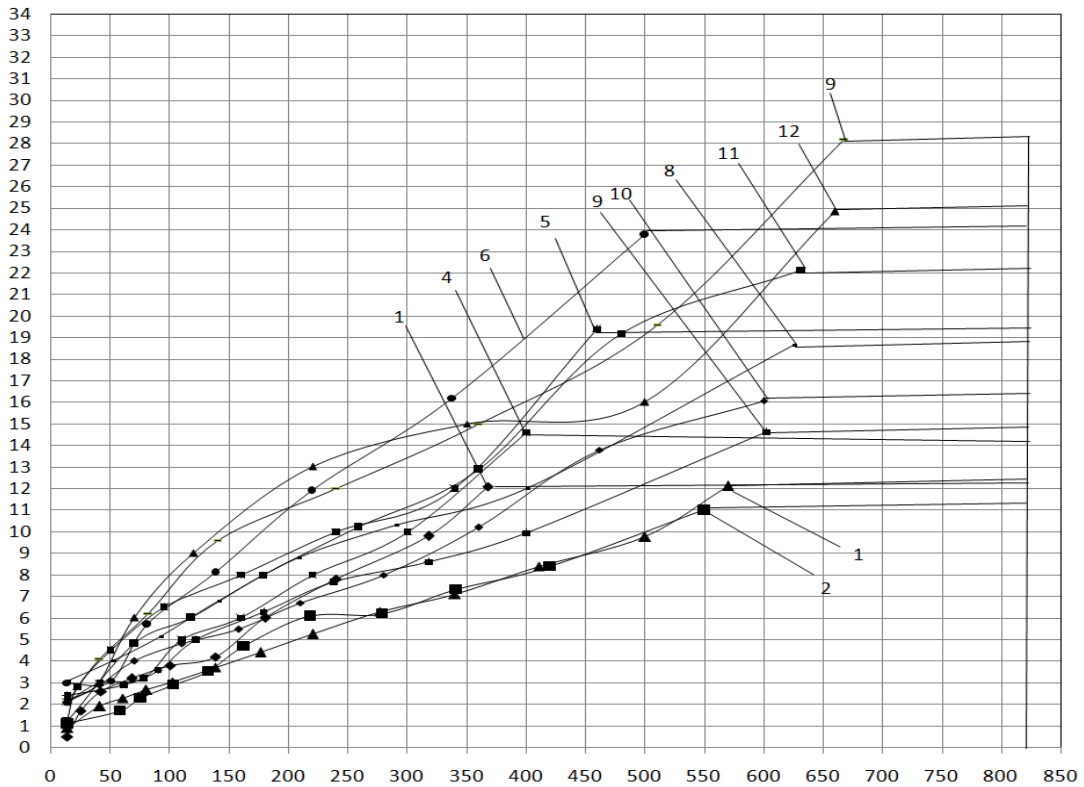


Рис. 2. Криві швидкості сушіння грибів Глива звичайна при температурах 40, 50, 60, і 70 °C.

40 C: 1 – Комбінований метод; 2 – Конвективний метод; 3 – Інфрачервоний метод. 50 C: 4 – Комбінований метод; 10 – Інфрачервоний метод; 7 – Конвективний метод. 60 C: 6 – Комбінований метод; 11 – Інфрачервоний метод; 8 – Конвективний метод. 70 C: 6 – Комбінований метод; 12 – Інфрачервоний метод; 9 – Конвективний метод.

На основі обробки графіків кривих сушіння і швидкості сушіння визначили залежності коефіцієнтів швидкості сушіння від температури теплоносія (рис.3). Дослідні дані наведені в таблицях 1, 2 та 3.

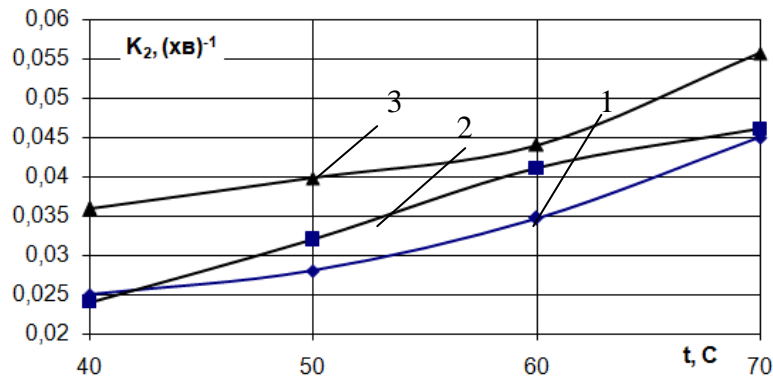


Рис. 3. Коефіцієнт швидкості сушіння в другому періоді залежно від температури теплоносія  
1 – конвективний метод; 2 – інфрачервоний метод; 3 – комбінований метод.

Коефіцієнти швидкості сушіння гливи звичайної культивованої конвективним способом (табл. 1)

Таблиця 1

№ п/п	t, °C	W <sub>кр.</sub> , %	dW/dτ, %/хв	K <sub>1</sub> , %/с <sup>-1</sup>	K <sub>1r</sub> *10 <sup>6</sup> , с <sup>-1</sup>	τ <sub>пр.</sub> , хв	τ <sub>1</sub> , хв	τ <sub>2</sub> , хв	τ <sub>заг.</sub> , хв
1	40	550	11	0.044	0.025	2	23	127	150
2	50	600	14.61	0.075	0.028	2	15	95	110
3	60	620	18.64	0.109	0.035	2	13	72	85
4	70	670	28.2	0.225	0.045	2	8	70	78

Коефіцієнти швидкості сушіння гливи звичайної культивованої інфрачервоним способом (табл. 2)

Таблиця 2

№ п/п	t, °C	W <sub>кр.</sub> , %	dW/dτ, %/хв	K <sub>1</sub> , %/с <sup>-1</sup>	K <sub>1r</sub> *10 <sup>6</sup> , с <sup>-1</sup>	τ <sub>пр.</sub> , хв	τ <sub>1</sub> , хв	τ <sub>2</sub> , хв	τ <sub>заг.</sub> , хв
1	40	570	12.12	0.0549	0.024	2	19	111	130
2	50	600	16.07	0.0822	0.032	2	15	97	112
3	60	630	22.13	0.1338	0.041	2	14	76	90
4	70	650	24.83	0.1834	0.046	2	8	70	78

Коефіцієнти швидкості сушіння гливи звичайної культивованої комбінованим способом (табл. 3)

Таблиця 3

№ п/п	t, °C	W <sub>кр.</sub> , %	dW/dτ, %/хв	K <sub>1</sub> , %/с <sup>-1</sup>	K <sub>1r</sub> *10 <sup>6</sup> , с <sup>-1</sup>	τ <sub>пр.</sub> , хв	τ <sub>1</sub> , хв	τ <sub>2</sub> , хв	τ <sub>заг.</sub> , хв
1	40	370	12.08	0.0287	0.0359	2	42	118	160
2	50	400	14.6	0.0369	0.0398	2	30	78	108
3	60	450	19.38	0.0577	0.044	2	20	70	90
4	70	500	23.76	0.0804	0.0557	2	15	68	88

При обробці даних з витрати енергії конвективним, інфрачервоним і комбінованим способами сушіння при різних температурах теплоносія, побудовано залежність витрат енергії від температури теплоносія (рис.4). З рисунка видно, що найвищі витрати енергії, були при конвективному висушуванні, а найменші при комбінованому методі.

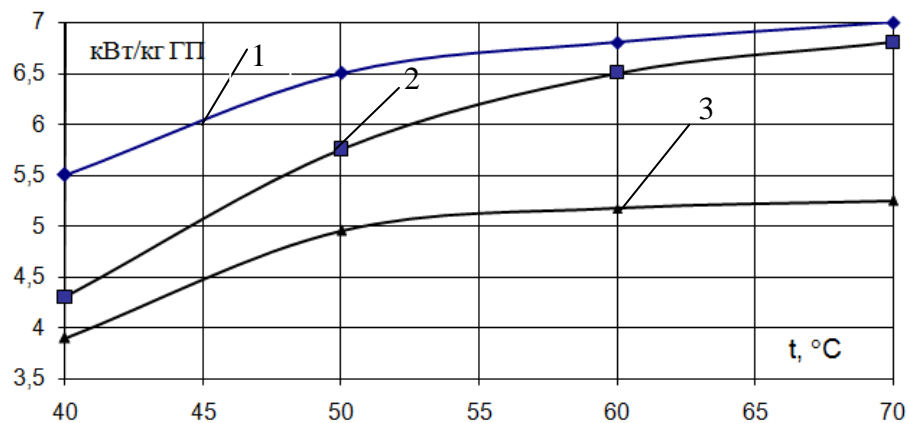


Рис.4. Залежність витрат енергії від температури теплоносія при різних методах енергопідведення, кВт/кг  
1 – конвективний метод; 2 – інфрачервоний метод; 3 – комбінований метод.

Для перевірки якості сушіння визначений вміст загального білка і загального азоту при сушінні конвективним, інфрачервоним та комбінованим методами при температурі 60 °С. З таблиці 4 спостерігається найвищий вміст білка при одночасному інфрачервоному і конвективному енергопідведенні.

#### Результати випробувань

Таблиця 4

№ зразку	Метод сушіння	Масова частка загального азоту, г/100 г продукту	Масова частка загального білка, г/100 г продукту	Масова частка сухої речовини, %
1	Свіжі гриби	0,413±0,005	2,59±0,02	22,02
2	Конвективний	3,215±0,005	20,09±0,02	81,12
3	Інфрачервоний	3,190±0,005	19,94±0,02	71,03
4	Комбінований	3,815±0,005	23,84±0,02	88,62

#### Висновки

На підставі здійсненого аналізу можна зробити висновок, що ІЧ- випромінювання поглинається в основному поверхню матеріалу, що створює в поверхневому і приповерхневому шарах градієнт температур, спрямований всередину нарізаного шматочками продукту. Це перешкоджає тепломасопереносу, тобто погіршує умови переміщення вологи з внутрішніх шарів до зовнішніх. Але при висушуванні в імпульсному режимі нагрів-охолодження, при одночасному конвективному і ІЧ-енергопідведенні з рециркуляцією повітря спостерігається підвищення якості кінцевого продукту, скорочення енерговитрат і прискорення процесу сушіння.

#### Література

1. Грибы. Справочник миколога и грибника Дудка И.А., Вассер С.П\_1987 -536с.
2. Бакайтис, В.И. Дикорастущие грибы как белоксодержащее сырье / В.И. Бакайтис, С.Н. Казакова, Л.В. Белокрылова // Потребительский рынок: качество и безопасность товаров и услуг: Материалы междунар. науч.-практ. конф. Орел: ОрелГТУ, 2004. - С. 103-106.
3. Атаназевич, В.И. Сушка пищевых продуктов / Справочное пособие. -М.: ДеЛи, 2000.-296 с.
4. Лабораторный практикум по курсу общей технологии броидильных производств. Великая Е. И., Суходол В. Ф.Издательство: Легкая и пищевая промышленность. 1983, ст.157.