

УДК 636.087.2

## ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ ПРОДУКТІВ В СУШАРКАХ ІЗ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ ІНЕРТНОГО НОСІЯ

**Сабадаш Сергій Михайлович**

кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-0371-8208  
Email: s.v.sabadash@ukr.net

**Савченко-Перерва Марина Юріївна**

кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-8498-3272  
email: marina.saw4encko2011@gmail.com

**Колодненко Віталій Миколайович**

ст.викладач  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-8450-6759  
Email: vn@ukr.net

Проведено дослідження процесу сушіння дисперсних продуктів. Встановлені кінетичні залежності між продуктивністю сушарки і температурою матеріалу в процесі його зневоднення. Представлена матриця планування експерименту і результати її реалізації.

**Ключові слова:** сушарка, киплячий шар, планування експерименту, продуктивність, середня температура.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2019.4.5>

### Постановка проблеми.

Під кінетику процесу сушіння розуміють зміну середнього вологовмісту і середньої температури тіла на протязі часу. Ці закономірності процесу сушіння дозволяють розрахувати кількість випареної вологи із матеріалу і витрату теплоти на сушіння.

В умовах оптимального гідродинамічного режиму з використанням методу планування експерименту нами проведено дослідження кінетики сушіння післяспиртової зернової барди в апараті із псевдозрідженим шаром.

**Метою роботи** є визначення кінетики сушіння післяспиртової зернової барди в апараті із псевдозрідженим шаром.

### Обговорення результатів дослідження.

Однією із актуальних задач при дослідженні процесів сушіння різноманітних матеріалів – встановлення однозначної залежності між продуктивністю сушарки і температурою матеріалу в процесі його зневоднення.

На рис. 1 приведені експериментальні дані по впливу температури сушильного агента на вході в сушильну камеру на питому продуктивність по випареній волозі.

Отримані криві свідчать про те, що температура являється найбільш істотним фактором, який впливає на продуктивність сушарки

На рис. 2 приведені данні, які характеризують взаємозв'язок між початковою вологістю матеріалу ( $\omega_n$ ) і питомою продуктивністю по волозі.

На рис. 3 приведені данні по впливу кінцевої вологи матеріалу ( $\omega_k$ ) на питому продуктивність по волозі.

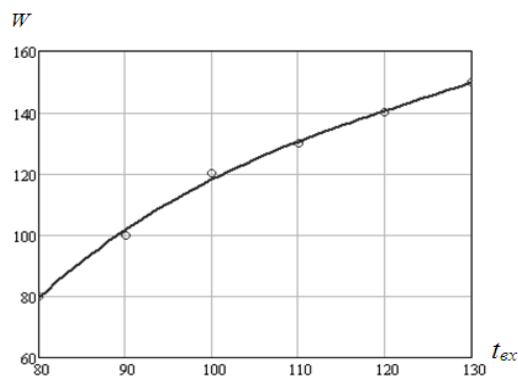


Рис. 1. Продуктивність сушарки (W кг вологи/м³год) за різної температури повітря на вході в камеру (t<sub>ex</sub>, °C) при  $\omega_n$  - 45 %,  $\omega_k$  - 10 %.

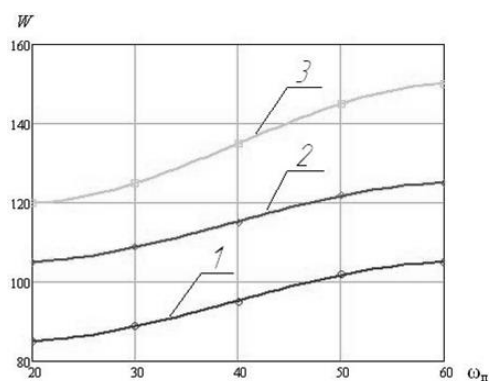


Рис. 2. Продуктивності сушарки (W кг вологи/м³год) за різної початкової вологості продукту при  $\omega_k$  - 10 %; t<sub>ex1</sub> - 90 °C; t<sub>ex2</sub> - 100 °C; t<sub>ex3</sub> - 110 °C.

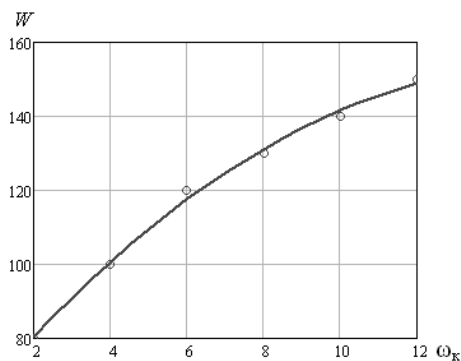


Рис. 3. Продуктивності сушарки (W кг вологи/м³год) від кінцевої вологи (ωк %) продукту.

Практично важлива узагальнююча залежність:  
 $W \text{ кг/м}^3\text{год} = f(\omega_n, \omega_k, t_{вх})$  (1)  
 досліджувалась з використанням статистичних методів планування експерименту [1,2,3,4]. Умови планування приведені в таблиці 1.

Для отримання лінійного приближення залежності (1) використовувався метод факторного планування експерименту типу 2<sup>3</sup>.

Матриця планування експерименту і результати її реалізації наведені в таблиці 2 (дослід 1-8).

Таблиця 1.

Умови планування експерименту

Найменування	t на вході в камеру, t <sub>вх</sub> °C	Початкова волога ω <sub>н.</sub> , %	Кінцева волога ω <sub>к</sub> , °C	Питома продуктивність по волозі кг/м³год
1	2	3	4	5
Рівень:				
нижній	90	35	8	
верхній	130	55	12	
базовий	110	45	10	
Інтервал варіювання	20	10	2	
Кодове значення	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	y

Таблиця 2

Номер досліджу	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	$\bar{y}$	(y <sub>1</sub> - $\bar{y}$ )	(y <sub>2</sub> - $\bar{y}$ )	(y <sub>1</sub> - $\bar{y}$ ) <sup>2</sup>	(y <sub>2</sub> - $\bar{y}$ ) <sup>2</sup>
1	+	-	-	-	+	+	+	-	106	115	110,5	-4,5	4,5	20,25	20,25
2	+	+	-	-	-	-	+	+	160	164	162	-2,0	2,0	4,0	4,0
3	+	-	+	-	-	+	-	+	142	149	145,5	-3,5	3,5	12,25	12,25
4	+	+	+	-	+	-	-	-	209	213	211	-2,0	2,0	4,0	4,0
5	+	-	-	+	+	-	-	+	106	115	111,5	-4,5	4,5	20,25	20,25
6	+	+	-	+	-	+	-	-	160	165	162,5	-2,5	2,5	6,25	6,25
7	+	-	+	+	-	-	+	-	212	221	216,5	-4,5	4,5	20,25	20,25
8	+	+	+	+	+	+	+	+	216	222	219	-3,0	3,0	9,0	9,0
														$\sum (y - \bar{y})^2 = 96,25$	

**Матриця планування експерименту та його реалізація**

Нижній рівень змінних позначений (-), верхній (+). Коefіцієнти рівнянь регресії [1] визначали за формулою (2):

Обчислення коefіцієнтів:

$$b_0 = \frac{\sum_{n=0}^N y_n}{N};$$

$$b_i = \frac{\sum_{n=0}^N x_i \cdot y_n}{N};$$

$$b_{ie} = \frac{\sum_{n=0}^N x_{in} \cdot x_{en} \cdot y_n}{N};$$

$b_0 = 167,1875$ ;  $b_1 = 21,4375$ ;  $b_2 = 30,8125$ ;  
 $b_3 = 9,9375$ ;  $b_{12} = -4,4375$ ;  $b_{13} = -7,8125$ ;  
 $b_{23} = 9,8125$ ;  $b_{123} = 7,9375$ .

Після обчислення коefіцієнтів регресії перевіряємо їх на значимість із використанням t – критерію за формулою (3).

$$t = \frac{b_i}{\sigma_{b_i}};$$

$$\sigma_{b_i} = \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{N}};$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{n=1}^n (\bar{y} - \bar{y})^2}{f}.$$

де, σ – середнє квадратичне відхилення;  
 N<sub>0</sub> – число дослідів у центрі експерименту;  
 N – число дослідів;  
 y – значення W на базовим рівнем.  
 Число ступенів вільності:  
 $f = N - (K + 1)$ ; де - число факторів;

$$\sum_{n=1}^N (y_i - \bar{y})^2 = 96,25.$$

У досліджуваному випадку число ступенів вільності дорівнює:

$$f = 8 - (3 + 1) = 4$$

$$\sigma_y^2 = \frac{96,25}{4} = 24,0625$$

$$\sigma_{ei} = \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{N}} = \sqrt{\frac{24,0625}{8}} = 1,7343.$$

Значення t- критерію для різних коефіцієнтів регресії розраховували по залежностях (3):

$$t_0 = 96,4; \quad t_1 = 12,36; \quad t_2 = 17,766; \quad t_3 = 5,7299; \\ t_{12} = -2,56266; \quad t_{13} = -4,5; \quad t_{23} = 5,6579;$$

Табличне значення t- критерію при  $f=4$  та надійності 0,95;  $t_{кр}=2,78$  [2].

У такому випадку незначним є коефіцієнт  $\beta_{1,2}$ . Кінцеве рівняння матиме вигляд:

$$y = 167,1875 + 21,4375X_1 + 30,8125X_2 + 9,9375X_3 - 7,8125X_1X_3 + 9,8125X_2X_3 - 7,9375X_1X_2X_3 \quad (4)$$

Перевірка рівняння на адекватність за рівняннями Фішера. Критичне значення критерію за рівнянням (4):

$$F_P = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{ei}^2} = \frac{24,0625}{1,734^2} = \frac{24,0625}{3,006756} = 8,00$$

#### Висновки.

1. При 5%- му рівні значимості і числа ступенів вільності для чисельника  $f_1 = 4$  і для знаменника  $f_2 = 3$  табличне значення критерію  $F_{кр}=8,84$ . Оскільки  $F_p < F_T$ , то модель, представлена рівнянням (4), адекватна [2].

2. Із рівняння (4) видно, що найбільший вплив на продуктивність сушарки по випареній волозі надає початкова волога матеріалу ( $x_2$ ), також потужний вплив надає температура на вході в камеру ( $x_1$ ) і кінцева ( $x_3$ ) волога матеріалу.

3. Температурний режим сушіння, який забезпечує отримання продукту із кінцевою вологою до 10 %, наступний: температура повітря:

на вході в камеру 100 - 130 °С;  
на виході із камери 40-60 °С.

#### Список використаної літератури:

1. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / Налимов В.В., Чернова Н.А. - М.: Наука. - 1965. - 340 с.
2. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. - М.: Машиностроение. - 1981. - 184с.
3. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. - М.: 1976. - 279с.
4. Харман К. Планирование экспериментов в исследовании технологических процессов / К. Харман, Э. Лецкий, В. Шефер. - М: Мир, 1977. - 552 с.

*Sabadash S.M., Sumy National Agrarian University (Ukraine)*

*Savchenko-Pererva M.Yu., Sumy National Agrarian University (Ukraine)*

*Kolodnenko V.M., Sumy National Agrarian University (Ukraine)*

#### **Investigation of the kinetics of the process of drying dispersed products in dryers with a fluidized bed inert carrier**

*A study of the drying process of dispersed products. Kinetic relationships between the dryer performance and the temperature of the material during its dehydration have been established. The presented experiment planning matrix and the results of its implementation.*

**Key words:** *dryer, fluidized bed, experiment planning, productivity, average temperature.*

Дата надходження до редакції: 24.09.2019