

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 51-74:664.723

Рівняння регресії температури та вологовмісту при мікрохвильово-конвективному сушінні

I. Л. Бошкова^{1✉}, Н. В. Волгушева², К. О. Канауз³, А. П. Гречановський⁴

¹⁻³Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна;

⁴Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

✉ e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;

³<http://orcid.org/0000-0003-2363-8819>; ⁴<http://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

Отримано рівняння регресії температури та вологовмісту шару зерна пшениці при мікрохвильово-конвективному сушінні. Для виведення рівнянь використовувалися дані досліджень сушіння зернових матеріалів з урахуванням методу планування повного факторного експерименту. Плани повного факторного експерименту представлені у вигляді таблиць з урахуванням рівнів факторів та номерів дослідів. Для зменшення впливу докільця та неконтрольованих факторів усередині кожної серії послідовність дослідів рандомізована. Рандомізацію проведено за допомогою генератора випадкових чисел. Як визначальні фактори обрана маса завантаження (x_1), час сушіння (x_2), швидкість продування шару повітрям (x_3). Вибір факторів обумовлений їх визначальним впливом на процес сушіння за фіксованої потужності мікрохвильового джерела. Для всіх дослідів вихідна потужність магнетрону становила 300 Вт. Представлено таблицю розширеного плану трифакторного експерименту, яка є загальною для отримання дослідних даних за середньою температурою та вологовмістом щільного шару зерна пшениці товщиною 1,5 см. Представлені рівняння регресії температури і вологовмісту в нормованому масштабі факторів з подальшим переведенням в натуральний масштаб. Наведено результати оцінки похибки рівнянь. Побудовані поверхні відгуку температури і вологовмісту від трифакторного впливу, що дозволяють наочно ілюструвати залежність досліджуваних параметрів сушіння від обраних факторів. Наведено аналіз впливу тривалості обробки, маси завантаження, швидкості повітря, що продувається крізь шар, на кінцеві значення температур і вологовмісту. Визначено фактори, що найбільше впливають на кінетику процесу сушіння, та встановлені режими, неприпустимі для сушіння насіннєвого зерна. Отримані рівняння задовільно описують характер зміни температури і вологовмісту в щільному шарі зерна при мікрохвильово-конвективному сушінні.

Ключові слова: Повний трифакторний експеримент; Щільний шар; Сушіння; Пшениця; Поліноміальна математична модель; Поверхня відгуку

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i1.2786>

© The Author(s) 2024. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

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



1. Вступ

Як показує сучасна практика, спроби створення нового обладнання, зокрема, для мікрохвильового сушіння, та його подальше використання без попереднього дослідження кінетики процесу не

приводили до бажаного результату [1]. Основою для конструювання нових установок є залежності для розрахунку температури і вологовмісту дисперсного матеріалу в процесі сушіння, а також експериментально визначені вимоги до геометричних характеристик шару і режимних параметрів

процесу і умови, за яких буде доцільно застосування того або іншого способу сушіння [2]. Проведення експерименту здебільшого пов'язано з матеріальними витратами, звідси постає завдання отримання максимуму інформації про об'єкт дослідження при мінімумі матеріальних витрат [3]. Вирішенням цього завдання займається планування експерименту. Як результат обробки експериментальних даних, доцільним є виведення рівнянь регресії [4], які дозволяють отримувати розрахункові значення певних параметрів, наприклад, температура і вологовміст, від визначальних факторів і проводити оцінку режимів обробки шару зерна при мікрохвильово-конвективному сушінні.

Сутність планування експерименту полягає у виборі числа та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення з необхідною точністю та достовірністю та мінімальною вартістю поставленого завдання [5]. При дослідженні об'єкта, як правило, не вдається виявити та контролювати всі фактори, що впливають на досліджувані параметри об'єкта. Тому, виходячи з попередньої інформації про об'єкт, виявляють основні фактори, що впливають, а вплив інших розглядають як «білий шум», накладений на справжні результати експерименту (так звана рандомізація експерименту). В результаті проведення експерименту, як правило, потрібно отримати математичну модель об'єкта, що досліджується. На емпіричному рівні досліджень як математичні моделі зазвичай використовують алгебраїчні поліноми (поліноміальні математичні моделі). Подібні моделі називають також рівняннями регресії. Найбільш простим у плануванні та обробці результатів є повний факторний експеримент [6]. У повному факторному експерименті досліджується один

параметр і реалізуються всі можливі поєднання рівнів факторів, при цьому завдяки однаковій віддаленості всіх експериментальних точок факторного простору від центру експерименту оцінки всіх коефіцієнтів рівняння регресії незалежно від їх величини обчислюються з однаковою похибкою (при виконанні умови відтворюваності дослідів) [7].

2. Метод планування повного факторного експерименту та обробки експериментальних даних

План повного факторного експерименту зображують як таблиці, стовпці якої відображають рівні чинників, а рядки – номери дослідів [8]. Ці таблиці називають матрицями планування експерименту (табл. 1). Оскільки значення рівнів факторів по модулю завжди дорівнюють одиниці, то у матриці планування записують лише знак рівня. Якщо для двох факторів усі можливі комбінації рівнів легко знайти прямим перебором, то зі зростанням числа факторів виникає потреба у певному прийомі побудови матриць. Для оцінки точності експерименту кожної i -ої точки факторного простору проводять K дослідів. В результаті одержують значення $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iK}$ досліджуваного параметра, для яких знаходять середнє значення y_i .

При цьому досліди в одній точці проводять не поспіль, а обходять усі точки в першій серії дослідів, потім у другій і так далі до K -ої. Для зменшення впливу довкілля та неконтрольованих факторів усередині кожної серії точки факторного простору обходять випадковим чином – рандомізують послідовність дослідів. Для більшої точності рандомізацію дослідів можна здійснити за допомогою генератора випадкових чисел.

Таблиця 1 – Розширений план трифакторного експерименту

N	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	+	-	-	-	-	+	+
3	+	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-	-	+
6	+	+	-	+	-	+	-	-
7	+	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+	+

Примітка: Експеримент проведено для наступних серій дослідів:

1 серія: 1,3,5,7,8,6,4,2;

2 серія: 3,7,6,4,2,1,5,8;

3 серія: 4,2,6,5,3,1,8,7.

3. Отримання рівняння регресії температури шару зерна пшениці при мікрохвильово-конвективному сушінні

Схема експериментальної установки та методика проведення експерименту наведена в [9]. Як фактори обрано масу завантаження (x_1), час сушіння (x_2), швидкість продування шару зерна повітрям (x_3). Вибір факторів обумовлений їх визначальним впливом на процес сушіння за фіксованої потужності мікрохвильового джерела. Приймаємо для x_1 основний рівень 0,3 кг інтервал варіювання 0,15 кг. Приймаємо для x_2 основний рівень 120, інтервал варіювання 60 с. Приймаємо для x_3 основний рівень 1,0 м/с інтервал варіювання 0,2 м/с (табл.2). Потужність магнетрону 300 Вт, товщина шару 0,015 м. Процес роботи магнетрону – циклічний. Здійснюється безперервне про-

дування крізь шар ненагрітим повітрям з температурою навколишнього середовища ($t_0 = 21$ °С).

Таблиця 2 – Рівні факторів експерименту для отримання даних за середньою температурою шару зерна

Характеристика	x_1	x_2	x_3
Основний рівень	0,3	120	1,0
Інтервал варіювання	0,15	60	0,2
Верхній рівень	0,45	180	1,2
Нижній рівень	0,15	60	0,8

У кожному досліді в комірку завантажувалася нова порція зерна з початковим вмістом вологи 24 %.

Експериментальні значення середньої температури шару зерна для мікрохвильово-конвективного сушіння наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Результати вимірювання середньої температури шару зерна пшениці в різних серіях дослідів

N	x_0	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3
1	+	-	-	-	45	47	44
2	+	+	-	-	39	36	38
3	+	-	+	-	82	77	80
4	+	+	+	-	62	59	64
5	+	-	-	+	42	45	39
6	+	+	-	+	36	33	35
7	+	-	+	+	80	79	81
8	+	+	+	+	61	57	59

Рівняння регресії температури в нормованому масштабі факторів набуває вигляду:

$$y = 55,0 - 6,74 \cdot x_1 + 15,09 \cdot x_2 - 1,09 \cdot x_3 + 3,01 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,34 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,41 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

У натуральному масштабі поліноміальна математична модель перетворюється на вигляд (2):

$$\begin{aligned} y &= 55,0 - 6,74 \cdot x_1 + 15,09 \cdot x_2 - 1,09 \cdot x_3 + \\ &+ 3,01 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,34 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,41 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = \\ &= 55,0 - 6,74 \cdot \left(\frac{m-0,3}{0,15} \right) + 15,09 \cdot \left(\frac{\tau-120}{60} \right) - \\ &- 1,09 \cdot \left(\frac{v-1,0}{0,2} \right) + 3,01 \cdot \left(\frac{m-0,3}{0,15} \right) \cdot \left(\frac{\tau-120}{60} \right) - \\ &- 0,34 \cdot \left(\frac{m-0,3}{0,15} \right) \cdot \left(\frac{v-1,0}{0,2} \right) + \\ &+ 0,41 \cdot \left(\frac{m-0,3}{0,15} \right) \cdot \left(\frac{\tau-120}{60} \right) \cdot \left(\frac{v-1,0}{0,2} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

Після перетворень отримуємо остаточне рівняння:

$$t = 44,19 - 46,4 \cdot m + 0,22 \cdot \tau + 6,15 \cdot v + 0,11 \cdot m \cdot \tau - 38,67 \cdot m \cdot v + 0,23 \cdot m \cdot \tau \cdot v - 0,068 \cdot \tau \cdot v, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

При трифакторному експерименті залежність $y = f(x_1, x_2, x_3)$ повинна зображатися в чотири-вимірному просторі, що візуально уявити неможливо. Тому одному з факторів доцільно вибрати фіксоване значення та уявити зміну форми поверхні відгуку в тривимірному просторі залежно від рівня зафіксованого фактора. За рівнянням регресії (3) при фіксованому значенні $v = 1,2$ м/с отримана поверхня відгуку, представлена на рис.1.

При максимальній масі завантаження та максимальній тривалості обробки за рівнянням регресії отримана температура 65 °С, а середня температура, що отримана в експерименті, дорівнює 59 °С. Похибка розрахункової формули становить 10 %. Слід врахувати, що експеримент відбувався за умов випаровування вологи, що впливало на

точність виміру температури. При мінімальній масі завантаження і максимальній тривалості обробки рівняння регресії отримана температура 74 °С, а середня температура, отримана в експерименті, дорівнює 80 °С. Похибка розрахункової формули становить 7,5 %. Отже, рівняння регресії

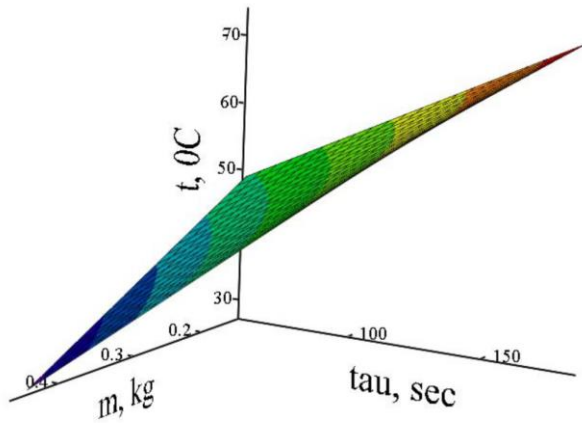


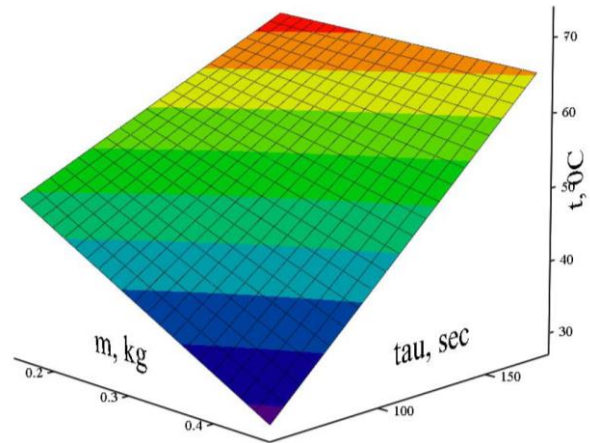
Рисунок 1 – Температура шару зерна залежно від маси завантаження та часу обробки в мікрохвильовій камері при швидкості продуваного крізь шар повітря $v = 1,2$ м/с

Збільшення маси завантаження в 3 рази призводить до зниження кінцевої температури при максимальній тривалості обробки та швидкості продування на 21 °С, при максимальній тривалості обробки та мінімальній швидкості продування кінцева температура знижується на 45 °С. При мінімальній масі, мінімальній швидкості продування та максимальній тривалості обробки кінцева температура шару зерна становила 80,2 °С, що неприпустимо при сушінні насінневого зерна.

Збільшення тривалості обробки в 3 рази призводить до збільшення кінцевої температури при максимальній масі та максимальній швидкості продування на 23 °С, при мінімальній масі обробки та максимальній швидкості продування кінцева температура підвищується на 37 °С. Режим при мінімальній масі та максимальній тривалості незалежно від швидкості продування призводить до неприпустимих кінцевих температур шару зерна.

Збільшення швидкості продування в 1,5 рази при максимальній масі та максимальному часі обробки в мікрохвильовій камері приводить до зниження температури на 3,7 °С (62,2 °С і 58,5 °С); при мінімальній масі та максимальному часі обробки в мікрохвильовій камері призводить до зниження температури на 0,7 °С. При цьому кінцеві температури становили 80,2 °С і 79,5 °С, тобто ці режими для сушіння насінневого зерна непри-

для розрахунку температури задовільно описує експериментальні дані. Для інших комбінацій факторів експерименту отримані поверхні відгуку, які свідчать про можливість застосування рівняння (3) для розрахунку температури при мікрохвильово-конвективному сушінні пшениці.



пустими. Таким чином, для умов, що розглядаються, вплив швидкості продування на температуру шару зерна несуттєво.

4. Отримання рівняння регресії вологовмісту шару зерна пшениці при мікрохвильово-конвективному сушінні

Для тих же факторів, що і для температури, отримано рівняння регресії вологовмісту в період постійної швидкості сушіння. Рівні факторів наведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Рівні факторів експерименту для отримання даних по середньому вологовмісту шару зерна

Характеристика	x_1	x_2	x_3
Основний рівень	0,3	420	1,0
Інтервал варіювання	0,15	180	0,2
Верхній рівень	0,45	600	1,2
нижній рівень	0,15	240	0,8

Примітка: Серії дослідів відповідали наступному порядку:

- 1 серія: 2, 4, 7,5,3,1,8, 6;
- 2 серія: 8,7,6,4,2,1,5,3;
- 3 серія: 6,3,5,7,8,1,4,2.

Результати експерименту щодо сушіння шару зерна в мікрохвильовій камері представлені в табл. 5.

Таблиця 5 – Середній вологовміст шару зерна при мікрохвильово-конвективному сушінні

N	x_0	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3
1	+	-	-	-	0,162	0,164	0,161
2	+	+	-	-	0,198	0,195	0,201
3	+	-	+	-	0,058	0,053	0,056
4	+	+	+	-	0,160	0,158	0,161
5	+	-	-	+	0,153	0,149	0,155
6	+	+	-	+	0,194	0,199	0,192
7	+	-	+	+	0,039	0,038	0,041
8	+	+	+	+	0,141	0,139	0,137

Рівняння регресії вмісту води в нормованому масштабі факторів має вигляд:

$$y = 0,138 + 0,035 \cdot x_1 - 0,019 \cdot x_2 - 0,006 \cdot x_3 + 0,016 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,003 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0014 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (4)$$

Поліноміальна математична модель у натуральному масштабі:

$$y = 0,138 + 0,035 \cdot x_1 - 0,019 \cdot x_2 - 0,006 \cdot x_3 + 0,016 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,003 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0014 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = 0,138 + 0,035 \cdot \left(\frac{m-0,3}{0,15} \right) - 0,019 \cdot \left(\frac{\tau-420}{180} \right) - 0,006 \cdot \left(\frac{v-1,0}{0,2} \right) + 0,016 \cdot \left(\frac{m-0,3}{0,15} \right) \cdot \left(\frac{\tau-420}{180} \right) -$$

$$-0,003 \cdot \left(\frac{\tau-420}{180} \right) \cdot \left(\frac{v-1,0}{0,2} \right) - 0,0014 \cdot \left(\frac{m-0,3}{0,15} \right) \cdot \left(\frac{\tau-420}{180} \right) \cdot \left(\frac{v-1,0}{0,2} \right) \quad (5)$$

Після перетворень отримуємо остаточне рівняння для розрахунку вмісту води:

$$u = 0,215 - 0,124 \cdot m - 0,00028 \cdot \tau - 0,0277 \cdot v + 0,00085 \cdot m \cdot \tau - 0,00026 \cdot m \cdot \tau \cdot v + 0,109 \cdot m \cdot v, \text{ кг/кг} \quad (6)$$

За рівнянням регресії (6) при фіксованому значенні швидкості продуваного крізь шар повітря $v = 1,0$ м/с отримана поверхня відгуку, представлена на рис. 2.

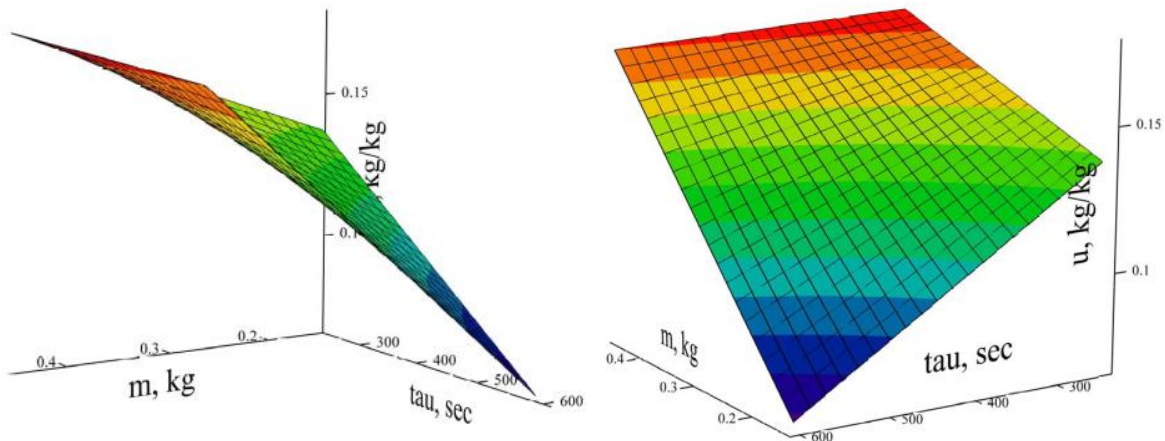


Рисунок 2 – Вологовміст шару зерна залежно від маси завантаження та часу обробки в мікрохвильовій камері при фіксованій швидкості продуваного крізь шар повітря $v = 1,2$ м/с

При максимальній масі завантаження і максимальній тривалості обробки за рівнянням регресії значення вологовмісту відповідало 0,141 кг/кг, а середній вологовміст, отриманий в експерименті, становив 0,139 кг/кг. Похибка розрахункової фор-

мули становить 14%. При мінімальній масі завантаження та максимальній тривалості обробки за рівнянням регресії отримано вологовміст 0,179 кг/кг, а середній вологовміст, отриманий в експерименті, становив 0,195 кг/кг. Похибка розрахун-

кової формули становить 8,2%. Видно, що рівняння регресії для розрахунку вологовмісту задовільно описує експериментальні дані. Для інших комбінацій факторів експерименту отримані поверхні відгуку, які свідчать про можливість застосування рівняння (6) для розрахунку вологовмісту при мікрохвильово-конвективному сушінні шару зерна пшениці.

Збільшення швидкості продування шару значно впливає на зменшення вологовмісту. Так, при збільшенні швидкості в 1,5 рази кінцевий вологовміст при максимальній масі завантаження і тривалості сушіння знизився в 1,13 рази, а при мінімальному завантаженні вплив істотніше – кінцевий вологовміст знизився в 1,27 рази. При збільшенні маси шару в 3 рази кінцевий вологовміст при максимальній швидкості продування і тривалості сушіння більше в 2,7 рази; при мінімальній швидкості продування і максимальної тривалості сушіння кінцевий вологовміст більше в 2,4 рази. Таким чином, вплив маси істотен на зниження вологовмісту. При збільшенні часу обробки в мікрохвильовій камері в 2,5 рази при максимальній швидкості продування і максимальній масі кінцевий вологовміст в 1,4 рази нижче; при максимальній швидкості продування і мінімальній масі кінцевий вміст вологи нижче в 2,3 рази. Таким чином, збільшення часу обробки призводить до зменшення кінцевого вологовмісту, при зниженні маси вплив часу обробки виявляється більш істотним.

5. Висновки

За результатами обробки експериментальних даних отримані рівняння регресії, що дозволяють з задовільною точністю проводити розрахунки температури і вологовмісту шару зерна пшениці при мікрохвильово-конвективному сушінні і проводити оцінку впливу маси завантаження, тривалості обробки в мікрохвильовій камері і швидкості повітря при продуванні.

Похибка рівняння регресії температури змінюється в межах 7,5-10 % залежно від маси завантаження. Збільшення маси завантаження в 3 рази приводить до зниження кінцевої температури за максимальної тривалості обробки і швидкості продування на 21 °С. При мінімальній масі, мінімальній швидкості продування та максимальній тривалості обробки кінцева температура шару зерна становила 80,2 °С, що неприпустимо при

сушінні насінневого зерна. Збільшення тривалості обробки в 3 рази приводить до збільшення кінцевої температури при максимальній масі та максимальній швидкості продування на 23 °С, при мінімальній масі обробки та максимальній швидкості продування кінцева температура підвищується на 37 °С. Режим при мінімальній масі та максимальній тривалості незалежно від швидкості продування приводить до неприпустимих кінцевих температур шару зерна.

Рівняння регресії для розрахунку вологовмісту задовільно описує експериментальні дані. Максимальна похибка рівняння регресії для вологовмісту становить 8,2 % при мінімальній масі завантаження і максимальній тривалості сушіння. При збільшенні маси шару в 3 рази кінцевий вологовміст при максимальній швидкості продування і тривалості сушіння більше в 2,7 рази; при мінімальній швидкості продування і максимальній тривалості сушіння кінцевий вміст вологи більше в 2,4 рази. Таким чином, вплив маси істотно на зниження вмісту вологи. При зниженні маси вплив часу сушіння на кінцевий вологовміст виявляється більш істотним. Збільшення часу сушіння в 2,5 рази призводить до зменшення кінцевого вологовмісту в 1,4 рази при максимальній швидкості продування і максимальній масі, і в 2,3 рази при мінімальній масі.

Особистий внесок авторів CRediT

Бошкова І. Л.: методичне забезпечення, планування експерименту. **Волгушева Н. В.:** створення методологічних засад роботи, експериментальні дослідження. **Капауз К. О.:** експериментальні дослідження, інформаційний пошук, аналіз даних. **Гречановський А.П.:** математична обробка результатів експериментів, побудова поверхонь відгуку.

Література

1. **Rattanadecho P., Makul N.** Microwave-Assisted Drying: A Review of the State-of-the-Art // *Drying Technology*. – 2015. – Vol. 34. – No. 1. – P. 1-38. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.957764>.
2. **S. Sabadash et al.** Improvement of equipment in order to intensify the process of dring dispersed food products // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 1. – No. 11 (103). – P. 15-21. DOI: <https://doi.org/10.15587/17294061.2020.192363>

3. Research Methodology. Chaudhary Charan Singh University, Meerut. URL: <https://ccsuniversity.ac.in/bridge-library/pdf/MPhil%20Stats%20Research%20Methodology-Part1.pdf>. (дата звернення 11.02.2024)
4. **Jiang L.** Application of MATLAB-Based Regression Analysis Model in Enterprises // *Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 328. – P. 239-243. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.328.239>
5. **Knight K.L.** Study/Experimental/Research Design: Much More Than Statistics // *Journal of Athletic Training*. – 2010. – Vol. 45. – No. 1. – P. 98-100. DOI: <https://doi.org/10.4085/1062-6050-45.1.98>.
6. **Antony J.** Full factorial designs // *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. – 2023. – P. 65-87. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-15173-6.00009-3>.
7. **Т. В. Чирка та ін.** Фізичні властивості вуглецевих сипучих матеріалів: монографія. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 151 с.
8. **N. Barka et al.** Full factorial experimental design applied to oxalic acid photocatalytic degradation in TiO₂ aqueous suspension // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2014. – Vol. 7. – No. 5. – P. 752-757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2010.12.015>.
9. **Волгушева Н. В., Угольников О. П.** Кінетика мікрохвильового сушіння зерна в нерухомому шарі // *Холодильна техніка та технологія*. – 2023. – Т. 59. – № 2. – С. 128-135. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i2.2633>.

Отримана в редакції 14.02.2024, прийнята до друку 28.03.2024

Regression equations of temperature and moisture content during microwave-convection drying

Iryna Boshkova^{1✉}, *Natalya Volgusheva*², *Kateryna Kapauz*³, *Andrii Hrechanovskyi*⁴

¹⁻³Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine;

⁴National University "Odesa Polytechnic", 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine

✉ e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;

³<http://orcid.org/0000-0003-2363-8819>; ⁴<http://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

Regression equations for the temperature and moisture content of the wheat grain layer during microwave-convective drying were obtained. To derive the equations, we used data from studies of drying grain materials, compiled on the basis of the method of planning a full factorial experiment. The plans of a full factorial experiment are presented in the form of tables, taking into account the levels of factors and numbers of experiments. To reduce the influence of the external environment and uncontrolled factors within each series, the sequence of experiments was randomized. Randomization was carried out using a random number generator. The determining factors were the mass of the load (x1), drying time (x2), and the speed of blowing the layer with air (x3). The choice of factors is determined by their decisive influence on the drying process at a fixed power of the microwave source. For all experiments, the magnetron output power was 300 W. A table of the extended plan of a three-factor experiment is presented, which is general for obtaining experimental data on the average temperature and moisture content of a dense layer of grain 1.5 cm thick. Regression equations for temperature and moisture content are presented on a normalized factor scale with subsequent conversion to a natural scale. The results of estimating the error of the equations are presented. The response surfaces of temperature and moisture content from the three-factor influence were constructed, which make it possible to clearly illustrate the dependence of the drying parameters under study on the selected factors. An analysis of the influence of treatment duration, load mass, and air speed blown through the layer on the final values of temperature and moisture content is presented. The factors that most influence the kinetics of the drying process have been determined, and regimes that are unacceptable for drying seed grain have been established. The resulting equations satisfactorily describe the nature of changes in temperature and moisture content in a dense layer of grain during microwave-convective drying.

Keywords: Complete three-factor experiment; Dense layer; Drying; Wheat; Polynomial mathematical models; Response surface

References

1. **Rattanadecho, P., & Makul, N.** (2015). Microwave-Assisted Drying: A Review of the State-of-the-Art. *Drying Technology*, 34(1), 1-38.
2. **Sabadash, S., Savchenko-Pererva, M., Radchuk, O., Rozhkova, L., & Zahorulko, A.** (2020). Improvement of equipment in order to intensify the process of drying dispersed food products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(11 (103)), 15-21.
3. Chaudhary Charan Singh University, Meerut. Retrived 11 February 2024 from <https://ccsuniversity.ac.in/bridge-library/pdf/MPhil%20Stats%20Research%20Methodology-Part1.pdf>.
4. **Jiang, L.** (2013). Application of MATLAB-Based Regression Analysis Model in Enterprises. *Applied Mechanics and Materials*, 328, 239-243.
5. **Knight, K. L.** (2010). Study/Experimental/Research Design: Much More Than Statistics. *Journal of Athletic Training*, 45(1), 98-100.
6. **Antony, J.** (2023). Full factorial designs. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, 65-87.
7. **Chirka, T. V., Vasilchenko, G. M., Panov, E. N.** (2016). Physical properties of carbon bulk materials: monograph. Kyiv: NTUU «KPI», 151.
8. **Barka, N., Abdennouri, M., Boussaoud, A., Galadi, A., Baâlala, M., Bensitel, M., Sahibed-Dine, A., Nohair, K., & Sadiq, M.** (2014). Full factorial experimental design applied to oxalic acid photocatalytic degradation in TiO₂ aqueous suspension. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(5), 752-757.
9. **Volgusheva, N. V., & Ugolnikov, O. P.** (2023). Kinetics of microwave drying of grain in a stationary layer. *Refrigeration Engineering and Technology*, 59(2), 128-135.

Received 14 February 2024

Approved 28 March 2024

Available in Internet 10 April 2024