

## **Математичне моделювання та оптимізація технологічних параметрів виробництва хліба з використанням плазмохімічно активованих розчинів**

О.А. Півоваров, доктор технічних наук

С.Ю. Миколенко, аспірант

Г.П. Тищенко, кандидат технічних наук

Дніпропетровський державний аграрний університет–ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний університет”

*Розглянуто особливості математичного моделювання та вирішення оптимізаційної задачі технологічних процесів виробництва хлібобулочних виробів на основі плазмохімічно активованих водних розчинів. Визначено оптимальні параметри тістоведення для запропонованої технології.*

Функціонування технологічного процесу виробництва хлібопекарської продукції як системи визначається умовами, що обмежують її мету, яка забезпечує контроль системи, тобто порівняння результатів її роботи з встановленими критеріями ефективності і оптимальності. Обмеженнями за якістю на виході системи є величина стандартної або найвищої якості виробів, а за кількістю – максимальний вихід готової продукції. Для ефективної роботи такої системи необхідно визначити вхідні умови її функціонування. Контроль інтервалу коливання кількості та якості сировини на вході надає можливість керування параметрами на виході й досягнення заданих кількісно-якісних характеристик готових виробів.

Відомо, що процеси хлібопекарського виробництва здебільшого є стохастичними і не мають достатньо розробленої теорії [1]. Тому для них перспективними будуть статистичні методи дослідження, які дозволяють оптимізувати процес. Для дослідження процесів хлібопечення раціональним є метод планування “активних експериментів”, що забезпечує деяке “похитування” процесу в певному інтервалі нормального режиму. За допомогою такого методу можна одержати коефіцієнти при значимих факторах у регресійних рівняннях, що характеризують математичну модель процесу.

У роботах [2–4] показано, що використання плазмохімічно активованих водних розчинів (ПАВР) замість магістральної води без додаткової обробки дозволяє інтенсифікувати технологічний процес виробництва хлібобулочних виробів, поліпшити характеристики напівфабрикатів під час бродіння і отримувати хлібопекарську продукцію високої якості. Це вказує на переваги використання таких розчинів перед традиційною технологією. Тому **метою роботи** стало математичне моделювання та оптимізація технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів з використанням плазмохімічно активованих водних розчинів.

Для складання математичної моделі виробництва хлібобулочних виробів на основі водних розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми як вихідні параметри, що визначають критерій ефективності або результат функціонування системи, було обрано показники питомого об'єму  $Y_1$  та формостійкості готових виробів  $Y_2$ , здатні комплексно відображати якісні характеристики хлібопекарської продукції. Оскільки запропонована технологія базується на використанні плазмохімічно активованих розчинів замість магістральної води без додаткової обробки, вхідними параметрами процесу встановлені:  $X_1$  – вологість тіста як важливий технологічний фактор, %;  $X_2$  – концентрація пероксидних сполук у ПАВР як параметр, що відображає ступінь дії контактної нерівноважної плазми на воду під час обробки, мг/л.

З метою визначення впливу керуючих параметрів на показники якості хліба було використано ортогональне центральне композиційне планування, що дозволяє побудувати математичну модель у вигляді рівняння регресії другого порядку на основі експериментальних даних дослідів, проведених у точках повного факторного експерименту, у центрі плану та в “зіркових точках” факторного простору [5, 6].

Встановлення кількісних зв'язків між показниками якості продукції та визначальними факторами здійснювалося на основі експериментальних даних пробних лабораторних випікань хліба згідно з ГОСТ 27669–88. В якості сировини використовували борошно пшеничне вищого сорту з середніми хлібопекарськими властивостями, пресовані хлібопекарські дріжджі, сіль кухонну харчову й плазмохімічно активовані водні розчини.

Умови проведення ортогонального центрального композиційного планування щодо основних характеристик плану наведено у табл. 1, план і результати ортогонального центрального композиційного планування – у табл. 2.

### 1. Характеристики планування

| Характеристика плану | Стандартний масштаб $X_i$ | Натуральний масштаб       |   |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|---|
|                      |                           | вологість тіста $X_1$ , % | концентрація пероксидних сполук у ПАВР $X_2$ , мг/л |
| Основний рівень      | 0                         | 44,0                      | 300   |
| Інтервал варіювання  | 1                         | 3,0                       | 200   |
| Верхній рівень       | +1                        | 47,0                      | 500   |
| Нижній рівень        | -1                        | 41,0                      | 100   |

Шляхом статистичної обробки експериментальних даних за відомою методикою [7] одержані наступні рівняння регресії:

для питомого об'єму, см<sup>3</sup>/100 г

$$Y_1 = 377,49 + 4,58X_1 + 5,46X_2 - 3,19X_1X_2 - 23,30X_1^2 - 21,68X_2^2, \quad (1)$$

для формостійкості, Н/Д

$$Y_2 = 0,460 - 0,013X_1 + 0,012X_2 - 0,016X_1X_2 - 0,053X_1^2 - 0,035X_2^2. \quad (2)$$

## 2. Матриця ортогонального центрального композиційного планування

| № досліду | $X_1$ | $X_2$ | $Y_1$ | $Y_2$ |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 1         | -1    | -1    | 329   | 0,35  |
| 2         | +1    | -1    | 330   | 0,36  |
| 3         | -1    | +1    | 344   | 0,43  |
| 4         | +1    | +1    | 332   | 0,38  |
| 5         | +1    | 0     | 371   | 0,37  |
| 6         | -1    | 0     | 333   | 0,41  |
| 7         | 0     | +1    | 362   | 0,40  |
| 8         | 0     | -1    | 345   | 0,42  |
| 9         | 0     | 0     | 383   | 0,50  |

Для перевірки адекватності рівнянь об'єкта моделювання використовували критерій Фішера, який являє собою відношення більшої дисперсії до меншої, тобто

$$F_{розр} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2} \text{ (при } S_{неад}^2 > S_y^2 \text{)} \text{ або } F_{розр} = \frac{S_y^2}{S_{неад}^2} \text{ (при } S_{неад}^2 < S_y^2 \text{)} \quad (3)$$

де  $S_{неад}^2$  – дисперсія неадекватності, яка характеризує розсіювання обчислених за отриманим рівнянням значень та середніх результатів дослідів;

$S_y^2$  – дисперсія похибки досліду, яка характеризує розсіювання значень у паралельних дослідах та середнього значення дослідів.

Оцінка адекватності моделі проводиться шляхом порівняння розрахункового значення критерію Фішера  $F_{розр}$  з критичним значенням  $F_{крит}$  та виконання умови:

$$F_{розр} < F_{крит}, \quad (4)$$

де  $F_{крит}$  знаходиться згідно з таблицею розподілення Фішера за числом ступенів свободи для чисельника і знаменника та рівня значущості  $\alpha = 5\%$ . Встановлено, що одержані рівняння адекватно описують даний процес під впливом змінних факторів. На рисунку наведено поверхні відгуку, описані рівняннями (1), (2). Центри поверхонь розміщено в околиці центра плану експерименту, що вказує на ефективність його планування з огляду на інтервал варіювання факторів.

Математичні моделі, отримані шляхом проведеного ортогонального центрального композиційного планування, надають можливість розв'язання компромісної задачі, яка полягає у встановленні максимальних значень критеріїв оптимізації – питомого об'єму та формостійкості хліба – за певних значень змінних факторів. Наслідком розв'язання такої задачі є знайдена зона компромісу  $D_{opt}$ , у якій лежать всі плезіоптимальні рішення [8].

Для пошуку оптимальних параметрів  $X_1$  та  $X_2$  використовували відому з математичного аналізу властивість функцій, що мають екстремум (у даному випадку – максимум) щодо перетворення першої похідної в нуль. Щоб розрахувати повну похідну в двофакторному просторі, для кожного з критеріїв

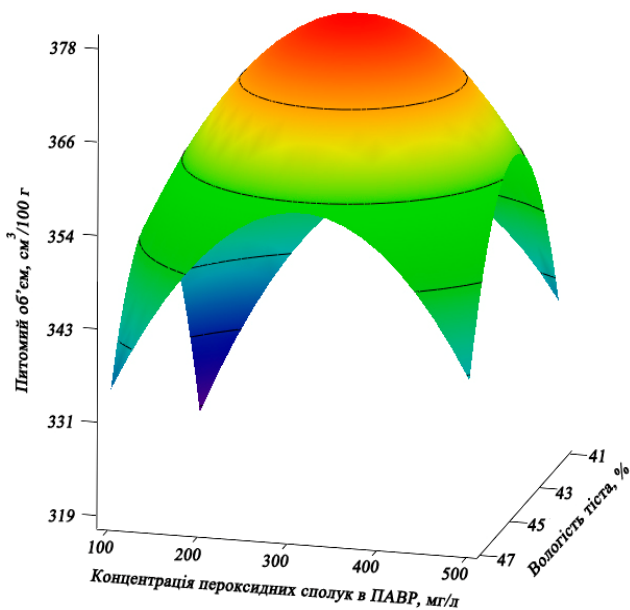
оптимізації знаходили частинні похідні за змінними  $X_1$  та  $X_2$ , що в системах рівнянь (5) і (6) має вигляд:  
для питомого об'єму

$$\begin{cases} \frac{\partial F(X_1, X_2)}{\partial X_1} = 4,58 - 3,19X_2 - 46,60X_1 = 0, \\ \frac{\partial F(X_1, X_2)}{\partial X_2} = 5,46 - 3,19X_1 - 43,36X_2 = 0, \end{cases} \quad (5)$$

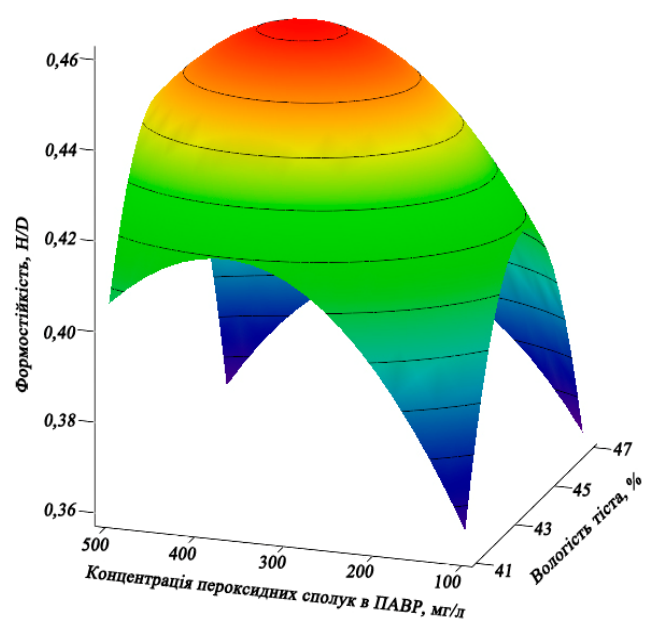
для формостійкості

$$\begin{cases} \frac{\partial F(X_1, X_2)}{\partial X_1} = -0,013 - 0,016X_2 - 0,106X_1 = 0, \\ \frac{\partial F(X_1, X_2)}{\partial X_2} = 0,012 - 0,016X_1 - 0,070X_2 = 0, \end{cases} \quad (6)$$

Розв'язання систем рівнянь (5) і (6) дозволило встановити, що максимум функцій досягається для  $Y_1$  при  $X_1 = 0,09$  і  $X_2 = 0,12$ ; для  $Y_2$  при  $X_1 = -0,16$  і  $X_2 = 0,21$ . Перевірку отриманих результатів проводили в середовищі MathCad 15.



а



б

**Поверхні відгуку залежності питомого об'єму (а) і формостійкості (б) хліба від вологості тіста та концентрації пероксидних сполук в плазмoxiмічно активованих водних розчинах**

Виявлення зони компромісу  $\Delta_{opt}$  ставить завдання розрахунку значень досліджуваних параметрів у точках факторного простору, виходячи з умови, що значення вологості тіста  $X_1$  та концентрації пероксидних сполук у плазмoxiмічно активованих водних розчинах  $X_2$  знаходяться в межах отриманих результатів пошуку оптимальних рішень для систем рівнянь (5), (6). Інтервал варіювання для критеріїв оптимальності було поділено на ділянки (табл. 3), а в отриманих точках факторного простору розраховані значення питомого об'єму  $Y_1$  та формостійкості хлібу  $Y_2$ . Отже, розрахунковим шляхом

були підтверджені значення факторів, які дозволяють за запропонованою технологією отримувати хліб з найбільш високими якісними характеристиками. Після переходу від кодованих до фізичних значень змінних факторів оптимальні параметри виготовлення хліба на основі водних розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, такі: вологість тіста становить 43,53–44,27 %; концентрація пероксидних сполук у плазмохімічно активованих водних розчинах – 324–342 мг/л. При вказаних значеннях параметрів питомий об'єм хліба становитиме 376,31–378,02 см<sup>3</sup>/100 г, формостійкість подових виробів складатиме 0,458–0,461 Н/Д.

### 3. Основні параметри розв'язання компромісної задачі

| Параметр пошуку зони оптимальності | Змінний фактор |       |
|------------------------------------|----------------|-------|
|                                    | $X_1$          | $X_2$ |
| Мінімальне значення                | -0,16          | 0,12  |
| Максимальне значення               | 0,09           | 0,21  |
| Інтервал варіювання                | 0,25           | 0,09  |
| Крок                               | 0,025          | 0,009 |

### Висновки

За допомогою ортогонального центрального композиційного планування на основі даних експериментальних досліджень було розроблено адекватні математичні моделі формування якісних характеристик хліба із пшеничного борошна при використанні плазмохімічно активованих розчинів замість магістральної води без додаткової обробки. Розв'язання оптимізаційної задачі шляхом пошуку зони компромісу дозволило встановити оптимальні значення вологості тіста і концентрації пероксидних сполук у водних розчинах, підданих дії контактної нерівноважної плазми, додержання яких у процесі тістоприготування надає змогу отримувати хлібопекарську продукцію високої якості.

### Бібліографія

1. Півоваров О.А. Зміна реологічних властивостей пшеничного тіста під впливом плазмохімічно активованих водних розчинів / О.А. Півоваров, С.Ю. Миколенко // Харчова наука і технологія. – 2011. – № 1. – С. 53–56.
2. Півоваров О.А. Особливості безопарного приготування хлібобулочних виробів з використанням плазмохімічно активованих водних розчинів / О.А. Півоваров, С.Ю. Миколенко // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. Донец. нац. ун-ту економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. – 2011. – Вип. 27. – С. 140–146.
3. Миколенко С.Ю. Застосування плазмохімічно активованих розчинів для інтенсифікації процесу газотворення в тістових напівфабрикатах / С.Ю. Миколенко, О.А. Півоваров // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – № 5. – С. 22–25.
4. Злобин Л.А. Оптимизация технологических процессов хлебопекарного производства / Л.А. Злобин. – М. : Агропромиздат, 1987. – 200 с.

5. *Красовский Г.И.* Планирование эксперимента / *Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов.* – Минск : Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1982. – 302 с.
6. *Саутин С.Н.* Планирование эксперимента в химии и химической технологии / *С.Н. Саутин.* – Л. : Химия, 1975. – 48 с.
7. *Грачев Ю.П.* Математические методы планирования экспериментов / *Ю.П. Грачев.* – М. : Пищевая промышленность, 1979. – 200 с.
8. *Остапчук М.В.* Математичне моделювання на ЕОМ: [підручник] / *М.В. Остапчук, Г.М. Станкевич.* – Одеса : Друк, 2006. – 313 с.