

В.І. Теличкун,
Є.В. Штефан,
О.В. Михайлов, к-ти техн. наук
Ю.С.Теличкун

РОЗРОБКА АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ У ТІСТОВІЙ ЗАГОТОВЦІ ПРИ ВИПІКАННІ ХЛІБА

Розглянута проблема створення математичної моделі тепломасообмінних процесів при випіканні хлібних виробів. Представлена аналітична частина математичної моделі (аналітична модель). Математична модель орієнтована на використання сучасних комп'ютерних технологій.

Ключові слова: випікання хліба, інформаційна технологія проектування, математична модель.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. Вітчизняна хлібопекарська промисловість використовує різноманітні печі, що відрізняються між собою продуктивністю, особливостями конструкцій, системою підведення та розподілення тепла, стабільністю роботи і якістю готової продукції.

Розробка сучасних конструкцій печей базується на великому практичному досвіді при конструюванні та експлуатації відповідного обладнання з використанням експериментальних і теоретичних досліджень процесу випікання хлібних виробів [1,2]. Тому створення теоретичних основ процесів, що відбуваються при перетворенні тістової заготовки у готовий виріб є актуальною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень у галузі розроблення теоретичних основ процесів, що відбуваються в робо-

© В.І. Теличкун, Є.В. Штефан, О.В. Михайлов, Ю.С.Теличкун, 2008

The problem of designing of the mathematical model of heat-mass transfer processes in bread baking is considered. The submitted analytical part of mathematical model (analytical model) is submitted. The mathematical model is focused on the modern computer technologies using.

Key words: bread baking, information technology of designing, mathematical simulation.

чих камерах хлібопекарських печей ґрунтуються на вченні тепло і масообміну [3]. В той же час досі відсутні достатньо повні методики обґрунтування та розрахунку як оптимального режиму випікання, так і вимог до конструкцій печей, що пояснюється великою різноманітністю і складністю процесів, що протікають в тісті-хлібі при випіканні і забезпечують якість готових виробів за відповідними показниками: об'єм, пропеченість, форма, стан і колір скоринки, смак, аромат та ін.

Існуючі методи розрахунку хлібопекарської печі передбачають визначення продуктивності печі, кількості тепла і палива необхідного для нагрівання тістової заготовки, але не враховують протікання внутрішніх теплових процесів і процесів формування ряду показників якості хліба (колір, глянець, форма, об'єм, смак, аромат та ін.) [4]. Такі розрахунки можна буде провести, при умові достатньо повного і точного

математичного опису кожного з процесів, що відбуваються при випіканні хліба. Математична модель процесу випікання може стати підставою для обґрунтування оптимальних умов процесу і дозволити формулювати вимоги до теплового режиму і конструкції печі.

Основні положення теорії переносу тепла і речовини в вологих колоїдних та капілярно-пористих матеріалах, до яких відноситься хліб, застосовують для рішення різних інженерно-технічних проблем термічної обробки різних матеріалів в тому числі харчових [3,4].

Дослідження складного механізму масопереносу в капілярно-пористих колоїдних тілах, дає можливість вдосконалювати наукову теорію різних технологічних процесів, а саме одного із найбільш складних процесів – випікання хліба, що в свою чергу спрямовано на інтенсифікацію процесу випікання, покращення якості готових виробів, вдосконалення конструкцій печей.

Для визначення конструктивно-технологічних параметрів процесу випікання хліба пропонується інформаційна технологія проектування (ІТП) [5], яка розглядає технологію перетворення тістових заготовок у готові вироби у вигляді сукупності взаємопов'язаних об'єктів: тістова заготовка, її розміри та властивості; температурні режими та конструкція печі.

Схематично ІТП представлено на рис. 1, з якого видно, що вона ґрунтується на математичній моделі процесу тепло-масообміну у тістовій заготовці при заданих режимах нагрівання. Аналітична частина математичної моделі ґрунтується на положеннях механіки дисперсних середовищ. Тістова заготовка розгля-

дається як волого-насічена дисперсна система із заданими геометричними параметрами.

Параметром, що характеризує процес переносу рідини в пористому тілі можна прийняти величину масо — вмісту [1] :

$$\alpha_m = M_{ж} / M_T, \quad (1)$$

або об'ємного вмісту речовини

$$\alpha_v = V_{ж} / V_T, \quad (2)$$

де $M_{ж}$ — маса рідкої фази об'єму $V_{ж}$ у представницькому елементі пористого матеріалу об'єму V_T ; M_T — маса пористого кістяка (твердої фази).

Волога в пористому кістяку може знаходитися як у рідкому, так і газоподібному станах в залежності від температури. Зміна вологовмісту відбувається в результаті її перерозподілу в об'ємі пористого матеріалу (механізм дифузії) з можливим виходом за межі заготовки через його поверхню. Температура заготовки визначає не тільки агрегатний стан вологи, але і термодинамічні сили, що реалізують перенесення тепла і вологи

$$F_t = -\frac{1}{T} \text{grad}T$$

$$F_u = -T \text{grad}\left(\frac{\eta}{T}\right), \quad (3)$$

де η — дифузійний потенціал [1], T — температура.

Щільність потоків тепла і вологи визначаються принципом лінійності Онзагера [1]:

$$J_t = -\frac{L_{11}}{T} \text{grad}T - L_{12} T \text{grad}\left(\frac{\eta}{T}\right); \quad (4)$$

$$J_u = -\frac{L_{21}}{T} \text{grad}T - L_{22} T \text{grad}\left(\frac{\eta}{T}\right). \quad (5)$$

З (4) і (5) маємо, що тепловий потік визначається не тільки градієнтом температури, але і градієнтом потенціалу дифузії. Аналогічно потік маси вологи визначається не тільки градієнтом потенціалу дифузії, але і градієнтом температур (термо-дифузії).

На основі принципу взаємності $L_{12} = L_{21}$ процес тепло-волоγο-переносу в дисперсному матеріалі можна визначити узагальненим вектором стану

$$\{Y\} = \begin{Bmatrix} T \\ u \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

де u — маса вологи у одиниці об'єму.

З врахуванням (6) процес тепло-волоγο-переносу описується системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = A \text{divgrad} Y + D \text{divgrad} Y^{-1} + W, \quad (7)$$

$$\text{де } Y^{-1} = \begin{Bmatrix} u \\ T \end{Bmatrix}; \quad (8)$$

$$A = \begin{Bmatrix} a_t \\ a_m \end{Bmatrix}; \quad (9)$$

a_t — коефіцієнт температуро — провідності;

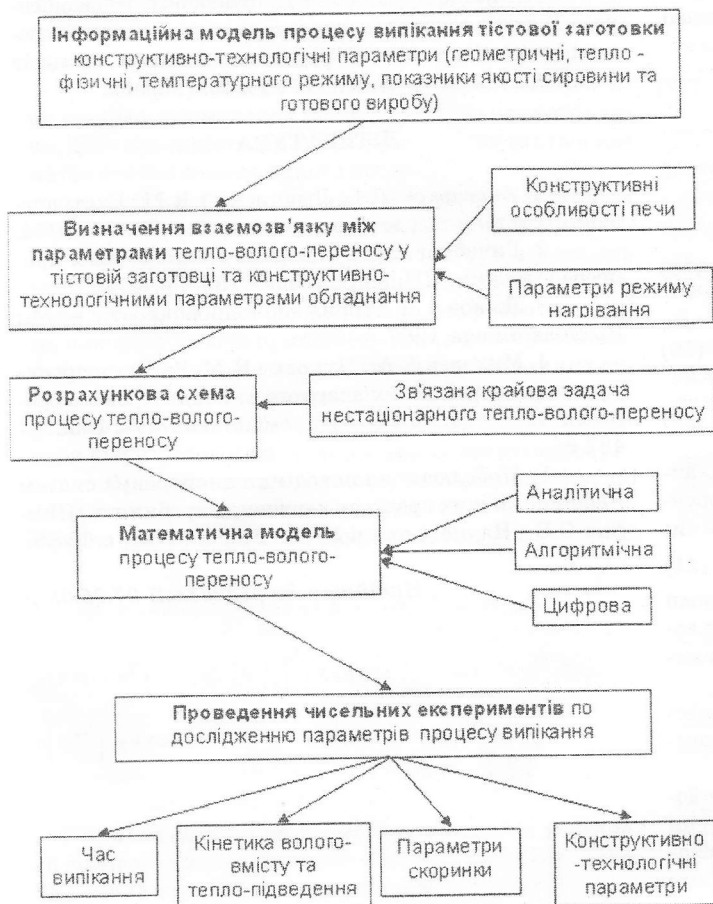


Рис.1. Схеми визначення конструктивно-технологічних параметрів процесу випікання хліба

$$a_t = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (10)$$

де λ — коефіцієнт теплопровідності матеріалу.
Для волого насиченого матеріалу

$$\lambda = \alpha_r \lambda_r + \alpha_t \lambda_t; \alpha_r + \alpha_t = 1 \quad (11)$$

де α_r, α_t — об'ємні змісти газової і твердої фаз відповідно; λ_r — коефіцієнт теплопровідності газу; λ_t — коефіцієнт теплопровідності твердої фази матеріалу, приймаємо у вигляді:

$$\lambda_r = \lambda_0 + c(T - T_0), \quad (12)$$

де λ_0, c, T_0 — константи.

Теплоємність матеріалу c_p визначається за формулою

$$c_p = a_r c_r + a_t c_t; \quad (13)$$

c_r — теплоємність газової фази;

c_t — теплоємність твердої фази, приймаємо у вигляді

$$c_t = c_0 + d(T - T_0), \quad (14)$$

де c_0, d, T_0 — константи.

Густина матеріалу ρ :

$$\rho = \alpha_r \rho_r + \alpha_t \rho_t \quad (15)$$

ρ_r, ρ_t — густини газової і твердої фаз відповідно;

ρ_r — приймаємо константою; $\rho_t = \rho_0 - b(T - T_0)$, ρ_0, b, T_0 — константи.

a_m — коефіцієнт дифузії вологи, приймаємо константою.

$$D = \left\{ \begin{array}{l} d_t \\ d_m \end{array} \right\}; \quad (16)$$

d_t — коефіцієнт дифузійної теплопровідності (конвективної),

$$d_t = \frac{d_m T}{C_{ж} \alpha_m} \left(\frac{\partial \eta}{\partial u} \right); \quad (17)$$

d_m — коефіцієнт термо-дифузії, $d_m = a_m \delta_u$,

де δ_u — відносний коефіцієнт молекулярного потоку вологи, приймаємо константою.

$$W = \left\{ \begin{array}{l} W_T \\ W_u \end{array} \right\}; \quad (18)$$

W_T — питома потужність внутрішніх джерел (стоків) тепла,

$$W_T = W_s + W_q; \quad (19)$$

$$W_s = \varepsilon \frac{C_m}{C_q} \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (20)$$

джерело, обумовлене перетворенням «пара-рідина», де ε — коефіцієнт (критерій) фазового перетворення, який визначаємо за експериментальними даними:

$$\varepsilon = \exp(-0,138(100 - T)) \text{ при } T \leq 100^\circ\text{C}; \quad (21)$$

$\varepsilon = 1$ при $T \geq 100^\circ\text{C}$. W_q — джерело, обумовлене іншими фізичними механізмами. W_u — щільність джерел вологи, що утвориться внаслідок різних фізичних механізмів в одиниці об'єму за одиницю часу.

Моделювання фазових перетворень в процесі нестационарного нагрівання тістової заготовки проводимо за такими критеріями:

1. Волога по системі «Вода-пара». Дане перетворення моделюється умовою по зміні температури $T \geq 100^\circ\text{C}$. Фізичний стан вологи визначається відповідним набором теплофізичних характеристик і об'ємних вмістів фаз (1), (2), (11) — (13).

2. Тверда фаза дисперсних матеріалів по системі «тісто-м'якушка-скоринка». Дане перетворення моделюється умовами по зміні вологовмісту u у кожному окремому елементі розглянутої області :

а) м'якушка $u_k \leq u \leq u_r$, де u_r — волога — вміст матеріалу «тісто», u_k — волога — вміст матеріалу «скоринка»; б) «скоринка» $u \leq u_k$;

Для замкнення системи рівнянь (1) — (21) доповнимо їх початковими і граничними умовами:

1. При $t=0$ заданий розподіл параметра $Y(0) = Y_0(X)$.

2. На частині границі тіла задані значення параметра $Y_1(X, t)$.

3. На частині границі задані тепло-масові потоки

$$\frac{\partial Y}{\partial n} = \varphi_2(X, t). \quad (22)$$

4. На частині границі відбувається тепло-масообмін з навколишнім середовищем для якої заданий вектор Y_0

$$Q = \beta(Y - Y_0),$$

де β — узагальнений коефіцієнт тепло — масообміну.

Рівняння (1) — (22) складають аналітичну модель процесу випікання тістових заготовок. Наступні роботи будуть присвячені розробленню методики розв'язання представлених співвідношень (алгоритмічна модель) та застосуванню комп'ютерних технологій для ефективного проведення обчислювальних експериментів (цифрова модель).

Висновки. Представлені математичні співвідношення складають основу для створення автоматизованої високоефективної системи аналізу закономірностей процесів перетворення тістових заготовок у хлібні вироби.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагвания (система тверде тіло — рідина). Л., «Хімія». 1974.
2. Гинзбург А.С. Теплофизические основы процесса выпечки. Пищепромиздат, 1955. — 474с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599с.
4. Михелев А.А., Цукович Н.М. Расчет и проектирование печей хлебопекарного и кондитерского производства. — М.: Пищевая промышленность, 1968. — 487 с.
5. Моделювання поведінки дисперсних систем у нерівноважних процесах харчових виробництв /Штефан Є.В., Наукові праці УДУХТ, 2000, № 8, с.63-66.

Надійшла до редколегії 07.05.08 р.