

УДК 641.523

MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL PROCESSING OF MEAT PRODUCTS

V. Pavelko, S. Hrybkov, A. Zaslavskiy, D. Dmytrenko
National University of Food Technologies

Key words:

heat treatment,
meat (sausage) products,
mathematical modeling,
heating (constructive)
calculation of the chambers

Article history:

Received 15.10.2016
Received in revised form
25.10.2016
Accepted 13.11.2016

Corresponding author:

Volodymyrpavelko
@gmail.com

ABSTRACT

The mathematical modeling of the heating and cooking processes of meat (sausage) products during their thermal processing in the steamer chambers (thermal chambers) of meat-packing factories is described in the article. A whole period of meat sausages thermal processing has been split into three stages, for each of them the duration has been determined by analytical solving of heat transfer equation for a slab representing a sausage. The designed mathematical model is proposed to introduce into the heating (constructive) calculation method of the above chambers. Thus defined durations of thermal processing stages depending upon the required temperature distribution inside the sausage can be used at a stage of thermal chambers engineering calculations.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ М'ЯСНИХ ВИРОБІВ

В.І. Павелко, канд. техн. наук,
С.В. Грибков, канд. техн. наук,
А.І. Заславский,
Д.С. Дмитренко
Національний університет харчових технологій

У статті здійснено математичне моделювання процесів нагрівання і варки м'ясних (ковбасних) виробів під час термічної обробки їх у пароварочних камерах (термокамерах) м'ясопереробних підприємств. Процес термічної обробки м'ясних виробів був розділений на три етапи, для кожного з яких тривалість була визначена шляхом аналітичного розв'язання рівняння перенесення теплоти для ковбасного виробу конкретної форми. Створену математичну модель пропонується впровадити у методику теплового (конструктивного) розрахунку названих вище термокамер.

Ключові слова: термічна обробка, м'ясні (ковбасні) вироби, математичне моделювання, тепловий (конструктивний) розрахунок термокамер.

Постановка проблеми. Процес термічної обробки м'ясних (ковбасних) виробів здійснюється в термокамерах і містить в собі 3 (три) стадії: нагрівання (підсушування), підсмажування, варка. Цей процес вважається завершеним, коли

температура на осі м'ясного виробу (ковбасного батона) сягає 72 °С [1]. Підбираючи режим (стадії) термообробки, необхідно врахувати не тільки рекомендації заводів-виробників відповідного обладнання, а й теоретичні знання стосовно розрахунку кожної стадії процесу термообробки м'ясних виробів.

Метою дослідження є створення математичної моделі процесу термообробки м'ясних (ковбасних) виробів з подальшим впровадженням її у методику теплового конструктивного розрахунку термокамер ковбасного виробництва. Для визначення характерних особливостей стадій процесу термообробки формалізуємо вищенаведені стадії нагрівання (підсушування), підсмажування і варки ковбасних виробів.

Матеріали і методи. Будь-який ковбасний виріб розглядаємо як предмет овально-циліндричної форми, тобто представляємо його у вигляді фігури (рис. 1), де Rh — радіус.



Рис. 1. Форма ковбасного виробу

Приймаємо D за діаметр ковбасного виробу, тобто $D = 2 \times Rh$, а довжину L за 1 метр. Якщо виріб має овальну, квадратну, або прямокутну форму в поперечному перерізі, то приймаємо за діаметр найменший радіус (рис. 2).

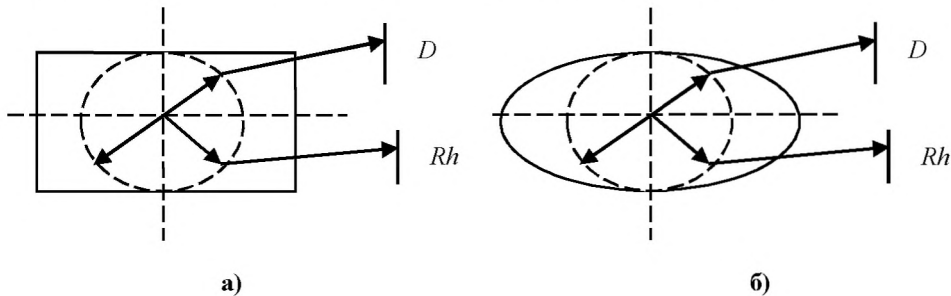


Рис. 2. Поперечний переріз ковбасного виробу: а) прямокутна форма; б) овальна форма

Вважаємо, що $Rh = R_0$, де R_0 — діаметр виробу (продукту) на початковій стадії термообробки.

Загальна тривалість процесу термічної обробки варених (варено-копчених) ковбасних виробів визначається за формулою:

$$\tau_{заг} = \omega_1 \times \tau_{підсуш} + \omega_2 \times \tau_{підсмаж} + \omega_3 \times \tau_{вар}, \quad (1)$$

де $\tau_{підсуш}$ — час нагрівання (підсушування); $\tau_{підсмаж}$ — час на підсмажування; $\tau_{вар}$ — час на варку ковбасного виробу; ω_i — коефіцієнт наявності i — тої стадії термічної обробки ($i = 1$ — нагрівання (підсушування), $i = 2$ — підсмажування;

$i=3$ — варка) в технологічному процесі виробництва продукту (виробу). Числове значення коефіцієнта $\omega_i = [0, 1]$. Якщо $\omega_i = 0$ — стадія процесу термообробки не використовується, при $\omega_i = 1$ — стадія термообробки використовується.

На кожній із стадій процесу термообробки ковбасного виробу діаметр його (радіус Rh) змінює своє значення відповідно до i -тої стадії обробки і розраховується за емпіричною формулою:

$$Rs_i = K_i R_0, \quad (2)$$

де K_i — коефіцієнт, що характеризує збільшення (приріст) радіуса ковбасного виробу під час термічної обробки його. Приймаємо значення $K_1 = 1$, ($i = 1$), $K_2 = 1,023$ ($i = 2$), $K_3 = 1,045$ ($i = 3$), [1].

Результати і обговорення. Розглянемо послідовно тривалість кожної стадії процесу термообробки.

Стадія нагрівання (підсушування) ковбасного виробу.

Тривалість стадії нагрівання (підсушування) ковбасного виробу визначається як сума часу, затраченого на нагрівання й сушіння виробу ($\tau_{\text{підсуш}}$), і часу, необхідного для випаровування конденсату, що утворюється на зовнішній поверхні ковбасного виробу при внесенні його у термокамеру ($\tau_{\text{конд}}$):

$$\tau_{\text{підсуш}} = \tau_{\text{нагр(сушки)}} + 60 \times \tau_{\text{конд}}. \quad (3)$$

Розрахунок часу $\tau_{\text{нагр(сушки)}}$ здійснюється за формулою:

$$\tau_{\text{нагр(сушки)}} = \frac{F_{0,\text{підсуш}} \times Rh^2}{a} = \frac{F_{0,\text{підсуш}} \times R_0^2}{a} = \frac{F_{0,\text{підсуш}} \times Rs_2^2}{a}, \quad (4)$$

де $F_{0,\text{підсуш}}$ — тривалість нагрівання (підсушування) у безрозмірному вигляді; a — коефіцієнт температуропровідності ковбасного виробу; для варених, варено-копчених ковбас $a = 5 \cdot 10^{-4}$ м/хв [1].

Значення критерію Фур'є $F_{0,\text{підсуш}}$, який відповідає часу, необхідному для досягнення в центрі ковбасного виробу (батона) заданої температури, визначається за формулою:

$$F_{0,\text{підсуш}} = \left(\frac{Bi_{\text{підсуш}} + 4}{8 \times Bi} \right) \times \left(\ln \left(\frac{2}{(Bi_{\text{підсуш}} + 2)(1 - T_{n,\text{підсуш}})} \right) + F'_0 \right), \quad (5)$$

де $Bi_{\text{підсуш}}$ — критерій Біо для стадії підсушки; $T_{n,\text{підсуш}}$ — безрозмірне значення температури поверхні продукту (виробу) в процесі підсушування; F'_0 — час проходження «температурного фронту», який визначається за номограмою [1].

Значення критерію Біо визначається за формулою:

$$Bi_{\text{підсуш}} = \frac{\alpha_{\text{підсуш}}}{\lambda} \times R_0 = 25.47 \times R_0, \quad (6)$$

де $\alpha_{\text{підсуш}}$ — коефіцієнт тепловіддачі при термічній обробці; λ — коефіцієнт теплопровідності (для варених і варено-копчених ковбас приймається $\lambda = 0,465$ Вт/м*К) [1].

Значення коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{\text{підсуш}}$ можна визначити за виразом:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{підсуш}} &= \alpha_{\text{середов}} \times (1 + 1,9 \times d) = \\ &= (6.16 + 4.49 \times W) \times (1 + 1,9 \times d) = 11,84 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \end{aligned} \quad (7)$$

де $\alpha_{\text{середов}}$ — коефіцієнт тепловіддачі від пароповітряного середовища в термокамері, який визначається за емпіричною формулою Юргеса [2]:

$$\alpha_{\text{середов}} = 6.16 + 4.49 \times W \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

де d — вологовміст продукту (ковбасного виробу) в кг води/кг середовища при температурі пароповітряного середовища в термокамері; $t_{\text{середов}} = 100$ °С і відносній вологості повітря $\phi = 10$ % вологовміст $d = 0,076$ кг/кг.

F'_0 — час проходження «температурного фронту», можна визначити за вищевказаною номограмою [1]. Але, визначивши критерій Біо $Bi_{\text{підсуш}}$ за формулою (6), можна розрахувати F'_0 за виразом:

$$\begin{aligned} F'_0 &\approx 0.7 * \left(\frac{1}{12} + \frac{1}{3 \times Bi_{\text{підсуш}}} - \frac{2}{3 \times (Bi_{\text{підсуш}})^2} \times \ln(1 + 0.5 \times Bi_{\text{підсуш}}) \right) = \\ &= 0.7 * \left(\frac{1}{12} + \frac{1}{3 \times 25.47 \times R_0} - \frac{2}{3 \times (25.47 \times R_0)^2} \times \ln(1 + 0.5 \times 25.47 \times R_0) \right) = \quad (8) \\ &= 0.7 * \left(\frac{1}{12} + \frac{1}{76.41 \times R_0} - \frac{2}{1946.16 \times R_0^2} \times \ln(1 + 12.74 \times R_0) \right). \end{aligned}$$

Безрозмірне значення температури поверхні продукту (виробу) в процесі підсушування визначається за формулою:

$$T_{n, \text{підсуш}} = \frac{t_{\text{кінь, сушіння}} - t_{0, \text{сушіння}}}{t_{\text{серед, сушки}} - t_{0, \text{сушіння}}}, \quad (9)$$

де $t_{\text{кінь, сушіння}}$ — температура поверхні виробу (ковбасного батона) в кінці процесу підсушування, °С; $t_{0, \text{сушіння}}$ — початкова температура поверхні ковбасного виробу (прийнято вважати, що $t_{0, \text{сушіння}} = 15$ °С), °С. Температура середовища

$t_{\text{серед, підсуш}}$ визначається технологічним регламентом відповідної стадії процесу термообробки ковбасних виробів.

Підставивши вирази (6) і (9) у формулу (5), отримуємо значення критерію Фур'є, який відповідає часу, необхідному для досягнення в центрі ковбасного виробу заданого значення температури:

$$F_{0, \text{підсуш}} = \left(\frac{25.47 \times R_0 + 4}{8 \times 25.47 \times R_0} \right) \times \left(\ln \left(\frac{2}{(25.47 \times R_0 + 2) \left(1 - \frac{t_{\text{кінц, суш}} - t_{0, \text{суш}}}{t_{\text{середов}} - t_{0, \text{суш}}} \right)} \right) + F'_0 \right). \quad (10)$$

Інакше, необхідно використовувати нанограму, враховуючи критерій $Bi_{\text{підсуш}}$

і параметр $\rho = \frac{Bi_{\text{підсуш}} - T_{n, \text{підсуш}} (Bi_{\text{підсуш}} + 2)}{Bi_{\text{підсуш}} (1 - T_{n, \text{підсуш}})}$, які дозволяють визначити F'_0 .

Час, необхідний для випаровування конденсату із зовнішньої поверхні ковбасного виробу, можна визначити за виразом:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{конд}} &= (2 - 0.46 \times Bi_{\text{підсуш}}) \times (21 \times T_{n, \text{підсуш}} - 8) = \\ &= (2 - 0.46 \times 25.47 \times R_0) \times (21 \times T_{n, \text{підсуш}} - 8). \end{aligned} \quad (11)$$

Тривалість стадії підсушування, враховуючи вирази (4) і (11), можна визначити за формулою:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{підсуш}} &= \frac{F_{0, \text{підсуш}} \times R_0^2}{\alpha} + 60 \times \tau_{\text{конд}} = \\ &= \frac{\left(\frac{Bi_{\text{підсуш}} + 4}{8 \times Bi_{\text{підсуш}}} \right) \times \left(\ln \left(\frac{2}{(Bi_{\text{підсуш}} + 2)(1 - T_{n, \text{підсуш}})} \right) + F'_0 \right) \times R_0^2}{\alpha} + 60 \times \tau_{\text{конд}}. \end{aligned} \quad (12)$$

1. Стадія підсмажування ковбасного виробу.

Тривалість стадії підсмажування $\tau_{\text{підсмаж}}$ можна визначити за виразом:

$$\tau_{\text{підсмаж}} = \frac{F_{0, \text{підсмаж}} \times R_{s_2}^2}{\alpha_{\text{підсмаж}}}, \quad (13)$$

де $R_{s_2} = R_0 \times K_2$ — середній діаметр (радіус) виробу в кінці стадії підсмажування.

Значення критерію Біо для стадії підсмажування визначається як:

$$Bi_{\text{підсмаж}} = \frac{\alpha_{\text{підсмаж}}}{\lambda} \times R_{S_2} = \frac{\alpha_{\text{підсмаж}}}{\lambda} \times R_0 \times K_2, \quad (14)$$

де $\alpha_{\text{підсмаж}}$ — коефіцієнт тепловіддачі від пароповітряного середовища до ковбасного виробу на стадії підсмажування, який визначається за вищенаведеною емпіричною формулою Юргеса (7):

$$\alpha_{\text{підсмаж}} = \alpha_{\text{підсуш}} = \alpha_{\text{середов}} \times (1 + 1,9 \times d) = 11,84 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

λ — коефіцієнт теплопровідності варених і варено-копчених ковбас, який приймається для стадії нагрівання (підсушування) $\lambda = 0,465 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [1].

Тривалість стадії підсмажування ковбасного виробу в остаточному варіанті визначається за виразом:

$$F_{0,\text{підсмаж}} = \left(\frac{Bi_{\text{підсмаж}} + 4}{8 \times Bi_{\text{підсмаж}}} \right) \times \left[\ln \left(\frac{2}{(Bi_{\text{підсмаж}} + 2)(1 - T_{n,\text{підсмаж}})} \right) + F'_0 - F_{0,\text{підсуш}} \right], \quad (15)$$

де

$$T_{n,\text{підсмаж}} = \frac{t_{\text{кінц, підсмаж}} - t_{0,\text{підсмаж}}}{t_{\text{середов, підсмаж}} - t_{0,\text{підсмаж}}}, \quad (16)$$

2. Стадія варки ковбасного виробу.

Розмірний час стадії варки $\tau_{\text{вар}}$ ковбасних виробів визначається за формулою (4), а критерій Біо — за формулою (6).

Діаметр (радіус) ковбасного виробу (батона) на стадії варки визначається за емпіричним співвідношенням:

$$R_{\text{вар}} = R_0 \times K_3 = 1,045 \times R_0.$$

Значення коефіцієнта тепловіддачі від пароповітряного середовища до зовнішньої поверхні ковбасного виробу можна визначити за виразом:

$$\alpha_{\text{вар}} = \alpha_{\text{середов}} \times (1 + 1,9 \times d) = 35,68 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

де d — вологовміст продукту (ковбасного виробу) при температурі пароповітряного середовища $t_{\text{серед}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ і відносною вологістю повітря $\phi = 90\%$. Згідно з технологічним регламентом процесу термообробки ковбасних виробів вищевказані параметри середовища $t_{\text{серед}}$ і ϕ повинні підтримуватися протягом стадії варки [3]. Для вищенаведених значень $t_{\text{серед}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\phi = 90\%$ вологовміст $d = 0,7653 \text{ кг}/\text{кг}$.

Значення критерію Біо для стадії варки визначається за формулою:

$$Bi_{\text{вар}} = 79,42 \times R_0. \quad (17)$$

Значення критерію Фур'є для стадії варки знаходимо за формулою (8), підставивши в неї вираз (17):

$$F_{0,вар} = 0.7 \left(\frac{1}{12} + \frac{1}{238,26 \times R_0} - \frac{2 \times \ln(1 + 39.71 \times R_0)}{18922,61 \times R_0^2} \right). \quad (18)$$

Тривалість стадії варки ковбасного виробу в безрозмірному значенні визначається за формулою:

$$F_{0,вар} = \left(\frac{Bi_{вар} + 4}{8 * Bi_{вар}} \right) \times \left[\ln \left(\frac{t_{вар,серед} - t_{вар,0}}{t_{вар,серед} - t_{вар,кінець}} \right) + F'_0 \right] = \left(\frac{79,42 \times R_0 + 4}{8 \times 79,42 \times R_0} \right) \times \left[\ln \left(\frac{t_{вар,серед} - t_{вар,0}}{t_{вар,серед} - t_{вар,кінець}} \right) + F'_0 \right], \quad (19)$$

де $t_{вар,кінець}$ — температура в центрі ковбасного виробу (батона) в кінці стадії варки.

При розрахунку тривалості стадії варки ковбасного виробу вважаємо, що початковий стан продукту (виробу) $t_{вар,0}$ можна охарактеризувати середньозваженою температурою:

$$t_{ср.вар,0} = \frac{t_{підсмаж} + t_{н,підсмаж}}{2}. \quad (20)$$

Розмірний час стадії варки $\tau_{вар}$ ковбасних виробів (батонів) визначається за формулою:

$$\tau_{вар} = 2142,45 \times F_{0,вар} \times R_0^2. \quad (21)$$

Висновки. Для повного процесу термічної обробки м'ясних виробів (ковбасних батонів) отримуємо математичну модель теплової (термічної) обробки варених і варено-копчених ковбас у вигляді:

$$\tau = 2000 \times F_{0,підсуш} \times R_0^2 + (2 - 11,72 \times R_0^2)(21 \times T_n - 8) + 2048,29 \times F_{0,вар} \times R_0^2 + 2142,45 \times F_{0,вар} \times R_0^2. \quad (22)$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Бражников, А.М. Аналитические методы исследования процессов термической обработки мясopодуктов: учеб. пособ. / А.М. Бражников, В.А. Карпычев, А.И. Пелеев. — М.: Пищевая пром-сть., 1974. — 365 с.
2. Ивашкин, Ю.А. Моделирование производственных процессов мясной и молочной промышленности: учеб. пособ. / Ю.А. Ивашкин. — М.: Агропромиздат, 1987. — 236 с.
3. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособ. / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. — Л.: Химия, 1987. — 576 с.

4. Павелко, В.І. Теплозабезпечення підприємств м'ясопереробної та молокопереробної галузей промисловості: навч. посіб. / В.І. Павелко. — Вінниця: Нова Книга, 2007. — 210 с.

5. Соколенко, О.Ю. Дослідження впливу деяких технологічних факторів на тривалість процесу термічної обробки ковбасних виробів / О.Ю. Соколенко, А.І. Заславський // Наукові праці НУХТ.— 2012. — № 45. — С. 31—35.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЯСНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В.И. Павелко, С.В. Грибков, А.И. Заславский, Д.С. Дмитренко
Национальный университет пищевых технологий

В статье приведено математическое моделирование процессов нагрева и варки мясных (колбасных) изделий во время термической обработки их в пароварочных камерах (термокамерах) мясоперерабатывающих предприятий. Процесс термической обработки мясных изделий был разделен на три этапа, для каждого из которых продолжительность определялась методом решения уравнения переноса теплоты для колбасного изделия определенной формы. Созданную математическую модель предлагается внедрить в методику теплового (конструктивного) расчета вышеуказанных термокамер.

Ключевые слова: термическая обработка, мясные (колбасные) изделия, математическое моделирование, тепловой (конструктивный) расчет термокамер.