

УДК 636.2.0.84.085.7.2.11/

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.113.29>

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ТА МАСООБМІНУ ОБРОБКИ М'ЯСНИХ ПАШТЕТІВ ЗА НАГРІВУ В ТАРІ

Приліпко Т.М. – д.с.-г.н., професор, професор кафедри технології виробництва, переробки і стандартизації продукції тваринництва, Подільський державний аграрно-технічний університет

Коваль Т.В. – к.с.-г.н., доцент кафедри агрохімії і загальнобіологічних дисциплін, Подільський державний аграрно-технічний університет

Наведені результати дослідження залежності кінетики біохімічних реакцій від теплової, хімічної й механічної чутливості оброблюваного продукту, від тиску, температури й хімічного потенціалу. Встановлено, що одним із ефективних способів як з точки зору інтенсифікації самого процесу теплообміну, так і економії енерговитрат є контактний нагрів продукту за допомогою подачі пари, що здійснює технологічний вплив на оброблювану продукцію. При цьому для переносу тепла можна застосовувати рівняння теплопровідності, у загальному вигляді для аналізу температурного поля в кожній із фаз – у твердій або рідкій окремо.

Встановлено, що в якості модифікації для оброблюваної продукції необхідне розв'язання теплогідромеханічних рівнянь із відповідними початковими й граничними умовами додатково до рівняння переносу для кожної скалярної величини. З'ясовано, що неоднорідний температурний розподіл є причиною неоднорідного розподілу щільності в середовищі, що здійснює тиск, який може впливати на температурний розподіл. Для врахування цього факту використали модель із неізотермічним потоком.

Зроблено припущення, що поле швидкостей потоку, u ($m\cdot s^{-1}$) відповідає рівнянню Нав'є-Стокса для стиснутої ньютонівської рідини відповідно до вихідної посилки Стокса і отримали певну систему рівнянь. Одна з основних ідей рівняння полягає в тому, що молекули, якщо переважають необхідні значення термодинамічної змінної тиску й температури, реагують відповідним чином. Отже, клітинні реакції можна моделювати аналогічно.

Індуковане тиском придушення життєдіяльності мікроорганізмів як скалярна величина залежить від інтенсивності джерела пригнічення життєдіяльності (наприклад, величина тиску в сполученні з барочутливістю відповідних мікроорганізмів), дифузійного переносу знижених мікроорганізмів на основі чистого броунівського руху й конвекційного переносу на основі примусової й природної конвекції в мікробіологічній суспензії. При порівнянні результатів розрахунку на ЕОМ з експериментальними даними встановлено, що рішення задачі розрахунку температурного поля продукту на ЕОМ дає досить задовільні результати між розрахунковими й експериментальними даними.

Ключові слова: тиск, температура, параметри, пароконтактне нагрівання, продукція, стерилізація, мікрофлора, тара, дифузія, фізико-хімічні показники.

Prylipko T.M., Koval T.V. Modeling of heat transfer and mass transfer process of meat paste processing when heating in containers

The article presents the results of research on the dependence of kinetics of biochemical reactions on thermal, chemical and mechanical sensitivity of the processed product, pressure, temperature and chemical potential. It was found that one effective way, both from the point of view of intensification of the process of heat transfer and energy savings, is the contact heating of the product by means of steam, responsible for the technological effect on the treated products. Here, for heat transfer we can apply the heat conduction equation in a general form for the analysis of the temperature field in each phase – solid or liquid separately.

It is established that as a modification for processed products it is necessary to solve thermohydrodynamic equations with appropriate initial and boundary conditions in addition to the transfer equation for each scalar value. It is found that the inhomogeneous temperature distribution is the cause of heterogeneous distribution of density in the environment that exerts pressure, which could affect temperature distribution. To account for this fact we used a model with a non-isothermal flow.

The assumption is made that the field of flow velocities, u (MS-1) corresponds to Navier-Stokes equation for compressible Newtonian fluid, respectively, the underlying assumptions for the Stokes, and we got the following system of equations. One of the main ideas of the equation is that molecule, if the required value of the thermodynamic variable of pressure and temperature predominate, react accordingly. Therefore, the cell reaction can be modeled similarly.

The pressure-induced suppression of microorganisms as a scalar value depends on the intensity of the source of the oppression of life (for example, the magnitude of the pressure in combination with the barosensitivity of the corresponding microorganisms), a diffusion transfer of destroyed microorganisms on the basis of pure Brownian motion and convection transfer through forced and natural convection in a microbial suspension. When comparing the results of calculation on computers with experimental data we established the fact that the solution of the problem of calculation of temperature fields of the product on a computer gives quite satisfactory results between numerical and experimental data.

Key words: *pressure, temperature, parameters, steam contact heating, production, sterilization, microflora, packaging, diffusion, physico-chemical parameters.*

Постановка проблеми. Сучасні технології виробництва м'ясних продуктів преміум сегменту повинні засновуватися на принципах ресурсозбереження, розширюючи асортимент делікатесної групи за рахунок раціонального використання сировини та пошуку альтернативних ресурсів. Нині перед фахівцями м'ясної промисловості стоїть комплекс завдань, серед яких все більш важливого значення набуває підвищення виробничої ефективності за рахунок поліпшення якості продукції з використанням сучасних, альтернативних прийомів. З метою вирішення цих пріоритетних питань необхідно застосовувати сучасні наукові досягнення щодо технологічного обладнання у вітчизняній практиці [1; 2].

Інколи процеси нагрівання або охолодження супроводжуються плавленням чи твердінням. До таких явищ переносу тепла можна також застосувати рівняння теплопровідності, у загальному вигляді для аналізу температурного поля в кожній із фаз – у твердій або рідкій окремо, але не разом. Це пов'язано з тим, що всередині системи діє рухоме джерело або стік тепла, а з двох боків від нього властивості середовища зазнають різких змін (тверда і рідка фази) [7].

Теплообмін при пароконтактному нагріванні продуктів є складним явищем, пов'язаним із одночасним перенесенням теплоти і маси речовини. При цьому кількість перенесеної маси визначається величиною сконденсованого пару, а передана теплота (за умови насиченого пару) – теплою паротворення [4; 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кінетика біохімічних реакцій різною мірою залежить від теплової, хімічної й механічної чутливості оброблюваного продукту, від тиску, температури й хімічного потенціалу. Тиск поширюється в рідині за принципом Паскаля у всіх напрямках. Це відбувається для невеликих адіабатичних змін тиску зі швидкістю звуку. З цієї причини можна припускати, що тиск виникає майже миттєво у всій камері. Із цього припущення випливає наявний у літературі, але не перевірений у реальних умовах висновок, що вплив тиску порівняно з термічними процесами має перевагу в тому, що може впливати прискорено й однорідною мірою на всю оброблювану речовину незалежно від форми, розміру й складу. Проте без уваги залишена можливість фізичної й термічної неоднорідності. Це пояснюється тим, що у фазі наростання тиску внаслідок зміни об'єму збільшується температура оброблюваного середовища [6; 9].

При пароконтактному нагріві враховується значна кількість визначних факторів, при цьому найбільших значень набувають як теплофізичні властивості гріючої пари, так і фізико-хімічні властивості продукту. Врахування всіх факторів, які впливають на процес теплообміну при пароконтактному нагріванні, є дуже важким не тільки в теоретичному, а й в експериментальному плані [2; 9; 5].

Постановка завдання. Створення високопродуктивного теплообмінного обладнання, яке відповідає сучасному рівню розвитку промисловості і техніки, потребує суттєвої інтенсифікації теплообмінних процесів. Одним із ефективних способів як з точки зору інтенсифікації самого процесу теплообміну, так і економії енерговитрат є контактний нагрів продукту за допомогою подачі пари, що здійснює технологічний вплив на оброблювану продукцію [3].

Завданням дослідження є розрахунок нестационарного температурного поля в тарі, що нагрівається з зовнішньої поверхні від джерела теплоти заданої інтенсивності з урахуванням конвекції в радіальному напрямку.

Матеріал і методи дослідження. Режими стерилізації визначали за методикою, при якій фактична летальність F_ϕ щодо мікрофлори має бути рівною або перевищувати необхідну летальність процесу стерилізації F_n ($F_\phi \geq F_n$).

Виклад основного матеріалу дослідження. Одна з основних ідей рівняння полягає в тому, що молекули, якщо переважають необхідні значення термодинамічної змінної тиску й температури, реагують відповідним чином. Отже, клітинні реакції можна моделювати аналогічно. Індуковане тиском придушення життєдіяльності мікроорганізмів як скалярна величина залежить від інтенсивності джерела пригнічення життєдіяльності (наприклад, величина тиску в сполученні з барочутливістю відповідних мікроорганізмів), дифузійного переносу знищених мікроорганізмів на основі чистого броунівського руху й конвекційного переносу на основі примусової й природної конвекції в мікробіологічній суспензії.

У випадку із в'язко-пластичними продуктами харчування відправною точкою є рівняння теплопровідності для температури T (К):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \alpha \frac{dP}{d\tau} T \text{ в зоні } \Omega^* \times (0, \tau_f), \quad (1)$$

де $\rho = \rho(T, P)$ щільність (кг/м³), $C_p = C_p(T, P)$ теплоємність (Дж/(кг·К)), $k = k(T, P)$ теплопровідність (Вт/(м·К)), τ_f – час (с).

Права сторона рівняння позначає внутрішнє підвищення температури за рахунок зміни тиску. Тут $P = P(\tau)$ – тиск (МПа), створюваний у камері, $\alpha = \alpha(T, P)$. Наводимо її так:

- коефіцієнт термічного розширення (К⁻¹) для продуктів харчування в зоні Ω^*F ,
- коефіцієнт термічного розширення (К⁻¹) для рідини, що створює тиск в зоні ΩP^* ,

– 0 у будь-якому іншому місці.

Ця умова є результатом такого закону [8]:

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{\alpha T V}{m C_p} = \frac{\alpha T}{\rho C_p}, \quad (2)$$

де ΔT – зміна температури за рахунок зміни тиску ΔP , V (м³) об'єм, m – (кг) маса.

У рівнянні теплопровідності (16) ми остаточно врахували відповідні вихідні й граничні умови залежно від конструкції обладнання.

$$\begin{cases} k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 & \rightarrow \Gamma^* \setminus (\Gamma_r^* \cup \Gamma_{up}^*) \times (0, \tau_f), \\ k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{exp} - T) & \rightarrow \Gamma_{up}^* \times (0, \tau_f), \\ T = T_0 & \rightarrow \Gamma_r^* \times (0, \tau_f), \\ T(0) = T_0 & \rightarrow \Omega^* \end{cases}, \quad (3)$$

де n – зовнішній нормальний одиничний вектор на межі робочої ділянки,
 T_0 – початкова температура,
 T_r – температура охолодження або нагрівання, що залишається постійною у межах відомої температури Γ_r^* (яка охолоджує або нагріває харчовий зразок),
 $T_{окр}$ – температура навколишнього середовища (постійна);
 h Вт/(м²·К) – коефіцієнт теплопередачі.

Оскільки ми використовували циліндричну систему координат і осьову симетрію, тому систему (16, 17) переписали як таку 2-мірну задачу:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \alpha \frac{dP}{d\tau} T \rightarrow \Omega \times (0, \tau_f), \\ k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \rightarrow \Gamma \setminus (\Gamma_r \cup \Gamma_{up}) \times (0, \tau_f) \\ k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{окр} - T) \rightarrow \Gamma_{up} \times (0, \tau_f) \\ T = T_r \rightarrow \Gamma_r \times (0, \tau_f) \\ T(0) = T_0 \rightarrow \Omega \end{array} \right. , \quad (4)$$

Ця модель підходить для випадку, коли коефіцієнт заповнення харчового зразка всередині камери набагато вищий, ніж коефіцієнт заповнення середовища, що здійснює тиск. Якщо коефіцієнт заповнення харчового зразка всередині камери не набагато вищий, ніж коефіцієнт заповнення середовища, що здійснює тиск, то остаточне рішення за допомогою цієї моделі може дуже відрізнятись від експериментальних показників.

Як уже зазначалося вище, неоднорідний температурний розподіл є причиною неоднорідного розподілу щільності в середовищі, що здійснює тиск і викликає піднімальну силу при русі рідини. Інакше кажучи, вільну конвекцію. Цей рух рідини може впливати на температурний розподіл. Для врахування цього факту ми використали модель із неізотермічним потоком і зробили припущення, що поле швидкостей потоку u (мс⁻¹) відповідає рівнянню Нав'є-Стокса для стискуваної ньютонівської рідини відповідно до вихідної посилки Стокса і отримали таку систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} - \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho C_p u \cdot \nabla T = \alpha \frac{dP}{d\tau} T \rightarrow \Omega^* \times (0, \tau_f), \\ \rho \frac{\partial u}{\partial \tau} - \nabla \cdot \eta (\nabla u + \nabla u^t) + \rho (u \cdot \nabla) u = \\ = -\nabla p - \frac{2}{3} \nabla (\eta \nabla \cdot u) + \rho g \rightarrow \Omega_p^* \times (0, \tau_f), \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} + \nabla \cdot (p u) = 0 \rightarrow \Omega_p^* \times (0, \tau_f), \end{array} \right. , \quad (5)$$

де g – гравітаційний вектор (м/с²);

$\eta = \eta(T, P)$ – динамічна в'язкість (Па с);

$p = p(x, \tau)$ – тиск, що виникає при масообміні всередині рідини,

$P + p$ – повний тиск (МПа) у середовищі, що здійснює тиск.

Необхідно підкреслити, що у правій частині першого рівняння (4) можна записати $\alpha \frac{d(P+p)}{dT}$, але ми робили припущення, що внутрішнім теплом, що виникає в результаті масообміну, можна знехтувати. У правій частині другого рівняння ми поставили Δp , тому що $P = P(\tau)$, що залежить тільки від часу й тому $\Delta(P+p) = \Delta p$, щільність $\rho = \rho(T, P)$ є фіксованою функцією стану.

Система рівнянь (5) була розроблена з урахуванням відповідних точок, меж і початкових умов:

$$\left\{ \begin{array}{ll} k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 & \rightarrow \Gamma^* \setminus (\Gamma_{\tau}^* \cup \Gamma_{\text{уп}}^*) \times (0, \tau_f) \\ k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{\text{окр}} - T) & \rightarrow \Gamma_{\text{уп}}^* \times (0, \tau_f), \\ T = T_r & \rightarrow \Gamma_r^* \times (0, \tau_f), \\ u = 0 & \rightarrow \Gamma_p^* \times (0, \tau_f), \\ T(0) = T_0 & \rightarrow \Omega^*, \\ p = 10^5 & \rightarrow A_1 \times (0, \tau_f) \end{array} \right. , \quad (6)$$

де A_1 – кутова точка Γ_p^* , що є межею зони Ω^* .

Необхідно зазначити, що стан точки A_1 означає, що повний тиск $(P+p)$ у цій точці дорівнює тиску в камері P плюс атмосферний тиск. Як показано вище, для моделі із теплопередачею за рахунок теплопровідності системи рівнянь (4), (5) і (6) можуть бути також переписані як еквівалент 2-мірної задачі з використанням циліндричних координат.

Висновки і пропозиції. Кінетика біохімічних реакцій залежить від теплової, хімічної й механічної чутливості оброблюваного продукту, від тиску, температури й хімічного потенціалу.

Одним із ефективних способів інтенсифікації процесу теплообміну є контактний нагрів продукту за допомогою подачі пари, що здійснює технологічний вплив на оброблювану продукцію.

Порівняння результатів розрахунку на ЕОМ з експериментальними даними дозволяє зробити висновок про те, що рішення задачі розрахунку температурного поля продукту на ЕОМ дає досить задовільні результати між розрахунковими і експериментальними даними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Вороненко Б.А., Пелененко В.В., Стариков В.В. Математическое описание процессов тепло- и массопереноса в колбасных изделиях при их тепловой обработке. *Процессы и аппараты пищевых производств*. 2008. № 2. С. 27–30.

2. Пат. № 83518 Україна, МПК⁹ А 23В4/00. Консервованний паштет із м'яса індиків / Приліпко Т.М., Куций В.М.; заявник і патентовласник Куций В.М. № u201304965; заявл. 18.04.2013; опубл. 10. 09.2013, Бюл. № 17/2013.

3. Пат. № 84152 Україна, МПК⁹ А23В4/00. Режим стерилізації консервованих паштетів / Приліпко Т.М., Куций В.М.; заявник і патентовласник Куций В.М. № u201304964; заявл. 18.04.2013; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19/2013.

4. Приліпко Т.М., Куций В.М. Паштет консервованний із м'яса індиків «Подільський»: ТУ У 10.1-22769675-001:2013. [Чинний від 2013.11.19]. Львів : ТК № 132 Держспоживстандарту України, 2013. 10 с. (Технічні умови).

5. І.П. Паламарчук, Ю.А. Полева, В.М. Куций. Математичне моделювання процесу тепломасообміну за умов пароконтактної стерилізації продукції у циліндричній тарі. Техніка, енергетика, транспорт АПК, ВНАУ. 2017. С. 64–70.
6. О.В. Цуркан, А.Ю. Гурич, Ю.А. Полева. Обґрунтування технологічної та конструктивної схеми автоклава з аеродинамічним інтенсифікатором. Наукові праці ОНАХТ, Том 2(46), 2014.
7. Ю.Г. Сухенко, І. П. Паламарчук, М.М. Жеплінська, М.М. Муштрук, Д.П. Журавель. Надійність обладнання харчової галузі : навчальний посібник. ЦП «КОМПРИНТ». 2019.
8. Г.М. Калетнік, В.П. Янович. Перспективи розвитку вібраційних машин для первинної обробки сільськогосподарської сировини. ВНАУ. 2017. 296 с.
9. Бухмиров В.В., Щербакова Г.Н., Пекунова А.В. Теоретические основы теплотехники в примерах и задачах. Учебное пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет». Иваново, 2013. 128 с.
10. Регламент (ЕС) № 852/2004 / ЄС Європейського Парламенту та Ради від 29.04.2004 з гігієни харчових продуктів.