**УДК 636.2.0.84.085. 7. 2.11**
**Т.М. Приліпко, д-р. с.-г. наук, проф.**
Подільський державний аграрно-технічний університет

# МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОБІОЛОГІЧНИХ ТА БІОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ОБРОБКИ МЯСНИХ КОНСЕРВІВ ЗА УМОВИ ПАРОКОНТАКТНОГО НАГРІВУ ПРОДУКЦІЇ В ТАРІ

**T. Prylipko, Dr., Prof.**

# MODELING OF MICROBIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PROCESSES DURING THE PROCESSING OF CANNED MEAT UNDER THE CONDITION OF STEAM CONTACT HEATING OF PRODUCTS IN CONTAINERS

**Вступ.** При пароконтактному нагріві враховується значна кількість визначних факторів, при цьому найбільші значення набувають як теплофізичні властивості гріючої пари, так і фізико–хімічні властивості продукту Основним параметром в процесі теплової стерилізації харчових продуктів, у тому числі і за допомогою пароконтактного нагріву, є температура продукту, яка являє собою основний фактор для встановлення режимів стерилізації консервів. Одним з основних завдань у дослідженні процесу стерилізації при означеному способі нагріву є визначення температурного поля продукту або виявлення динаміки зміни температури в різних точках продукту залежно від параметрів пари, умов її підведення до продукту та фізичних властивостей оброблюваної сировини[1, 3 ].

**Матеріал і методи дослідження.** Метою є розрахунок нестаціонарного температурного поля в тарі, що нагрівається з зовнішньої поверхні від джерела теплоти заданої інтенсивності з урахуванням конвекції в радіальному напрямку.

Режими стерилізації визначали за методикою, при якій фактична летальність $F_ф$ щодо мікрофлори має бути рівною або перевищувати необхідну летальність процесу стерилізації $F_н$ ($F_ф \geq F_н$).

**Результати досліджень.** Для формального визначення збільшення температури, викликаного підвищенням тиску, ми скористалися спочатку рівнянням збереження з якого вивели рівняння (1) відносно загальної тепломісткості H.

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \frac{\partial p}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\xi \cdot \vec{v}) + \rho \vec{q} \cdot \vec{v}, \quad (1)$$

де $\vec{v}$ – вектор швидкості рідини, $\vec{q}$ – вектор сили ваги, $\rho$ – щільність рідини, кг/м$^3$;
$p$ – тиск, Па , $\tau$ – час, с., $\xi$ – тензор грузлих напруг.

Подальше використав рівняння для конкретної тепломісткості $h$

$$\rho \frac{Dh}{D\tau} - \frac{Dp}{D\tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \eta \Phi + \rho \vec{q} \cdot \vec{v}, \quad (2)$$

де $\Phi$ функція дисипації, і використовуючи термодинамічне відношення

$$\frac{Dh}{D\tau} = \frac{\partial h}{\partial p}\bigg|_T \frac{Dp}{D\tau} + \frac{\partial h}{\partial T}\bigg|_p \frac{DT}{D\tau} = \frac{1}{\rho}(1 - \alpha T)\frac{Dp}{D\tau} + c_p \frac{D\tau}{D\tau}, \quad (3)$$

де: $\alpha$ – це коефіцієнт термічного розширення,
ми отримали рівняння теплової енергії

$$\rho c_p \frac{DT}{D\tau} = \alpha T \frac{Dp}{D\tau} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \eta \Phi + \rho \vec{q} \cdot \vec{v}. \quad (4)$$

Останнє рівняння показує, що матеріальною похідною температури $T$ щодо часу $t$ керує матеріальна похідна тиску $p$ щодо часу τ, поки функція дисипації $\Phi$ та

потенційна енергія, а також потік, що проводить високу температуру, перебувають на низькому рівні. Ураховуючи це, ми приблизно вивели рівняння переносу теплової енергії:

$$\frac{DT}{D\tau} \approx \frac{\partial T}{\rho c_p} \frac{Dp}{D\tau}. \quad (5)$$

Вважається, що рух рідини обов'язково присутній при обробці рідкої речовини тиском. Щоб показати це математично, ми припустили, що щільність збільшується зі збільшенням тиску й зменшується зі збільшенням температури, що обґрунтовано для більшої частини харчових продуктів і подібних речовин в умовах навколишнього середовища. Появу поля бігу в рідині, яка спочатку перебуває в спокої, під час стиснення ми показали за допомогою рівняння балансу маси

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0. \quad (6)$$

Під час фази стиснення щільність збільшується зі збільшенням тиску. Отже, перший член рівняння (11) стає відмінним від нуля. Так як ліва частина повинна дорівнювати нулю, швидкість рідини $\vec{v}$ повинна прийняти ненульові значення. Тому, збільшення тиску підсилює рух рідини. Температурні градієнти відіграють важливу роль у відхиленні поводження потоку від гідростатичного стану. Цей висновок ми простежили, скориставшись основними рівняннями гідростатики:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad (7) \qquad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho \vec{q}. \quad (9)$$

У рівняннях x, уі z є декартівськими координатами. Без втрати $z$ загального уявлення ми прийняли, що вектор сили ваги вказує в негативному $z$ напрямку. Подальше перетворення рівняння (9) у відношенні й рівняння (3.10) у відношенні дали такий результат:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial y \partial z} = \frac{\partial^2 p}{\partial z \partial y} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} \vec{q}. \quad (10)$$

Отже, права частина рівняння ( 10) і похідна щільності у відношенні $y$ повинна бути постійною й дорівнювати нулю

$$\frac{\partial^2 p}{\partial y \partial z} = \frac{\partial^2 p}{\partial z \partial y} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} \vec{q}. \quad (11)$$

Але, ця умова, як випливає з гідростатики, не може зберігатися. Поки щільність є функцією температури, а остання піддається передачі в напрямку, відмінному від напрямку вектора сили ваги, рівняння (11) порушується. Як наслідок, обов'язково повинен з'явитися потік пари зі швидкістю, відмінною від нуля, що приводить до конвективної передачі високої температури й завислих речовин. Для з'ясування впливу параметрів пари, на розподіл температурного поля продукту нами проведено розрахунки при різних температурах гріючої пари. Підвищення температури сприяє інтенсифікації процесу теплопередачі, що призводить до появи різко вираженого перепаду температури між центральними і периферійними областями. 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. Перенос молекулярної

(індекс m) і клітинної (індекс z) систем відбувається за допомогою індукованих примусовою й природною конвекцією механізмів. На підставі невеликих діапазонів довжин ($l_m^* \approx 10^{-9}$ м для протеїнів і $l_z^* \approx 10^{-6}$ м для мікроорганізмів) вони перебувають у механічній і тепловій рівновазі. Характеристичні внутрішні шкали часу переносу імпульсу у воду як дисперсійне середовище $\tau_{i,\,m}^{внутр*} = \frac{l_m^{*\,2}}{\nu^*} \approx 10^{-12}$ с і $\tau_{i,\,z}^{внутр*} = \frac{l_z^{*2}}{\nu^*} \approx 10^{-6}$ с дають указівку щодо механічної рівноваги. Аналогічно характеризують внутрішні шкали часу $\tau_{i,\,m}^{внут*} = \frac{l_m^{*\,2}}{a^*} \approx 10^{-11}$ с і $\tau_{e,\,z}^{внутр*} = \frac{l_z^{*2}}{a^*} \approx 10^{-5}$ с перенос енергії у воду. Ці оцінки вимагають подальшого розгляду поблизу меж переходів фаз. Спостерігається зміна стану «час реакції на термогідродинамічний вплив», тому що вони створюють поля швидкостей, поля індукованих тертям нормальних напруг і тангенціальних напруг, а також поля тиску й температури.Наведені вище розміри внутрішніх шкал часу диспергованих молекулярних і клітинних систем значно відрізняються від типової тривалості процесу $\tau^{проц*}$ *обробки*. Отже, число Дебори $De = \frac{\tau^{внутр\,*}}{\tau^{проц*}}$ приймає нескінченно мале значення. Цей безрозмірний індекс виражає локальну рівновагу, тобто наявність «конгруентного термогідродинамічного стану» безперервної фази й диспергованих молекулярних і клітинних систем у будь–який момент часу в процесі впливу високого тиску при даних просторових координатах, що значно полегшує моделювання, так як дозволяє нам відобразити технологічний вплив на молекулярні й клітинні реакції як загальні скалярні величини Θ*. У безрозмірному вигляді для відношення $\Theta = \frac{\Theta^*}{\Theta_0^*}$ ми отримали відповідну модель переносу:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \nabla \cdot \left(\Theta \vec{U}\right) = \frac{1}{\mathrm{Re}_0\, Sc_0} \nabla \cdot \left(D_\Theta \nabla \Theta\right) + D_{a0} Q_\Theta \qquad (12)$$

Ліва сторона рівняння моделі повністю збігається з рівнянням збереження маси. Для молекулярного біокомпонента рівняння (12) виражає індуковані зміни, які пов'язані з дифузією, а також з якісною зміною (активацією або дезактивацією) біокомпонентів. Ефекти дифузії ґрунтуються на існуванні неоднорідних полів скалярної величини Θ. Параметр $D_\Theta$ у першому члені правої сторони рівняння (12) даний для константи дифузії молекулярного або клітинного процесу. Величина дифузії залежить, очевидно, від зворотного значення добутку критерію Рейнольдса $Re_0$ і критерію Шмідта $Sc_0 = \frac{\nu_0^*}{D_\Theta^*} ab$. Критерій Шмідта дає оцінку відношенню дифузійного переносу імпульсу до скаляра $\Theta$. Наступний ефект, пов'язаний з позитивним або негативним "виробництвом" $\Theta$, виражає безрозмірний початковий член $D_{a0} Q_\Theta$. Значення критерію Дамкьоллера $D_{a0}$ встановлює інтенсивність джерела $Q_\Theta$. Він описує відношення між конвекційною шкалою часу й шкалою часу молекулярної реакції. Наприклад, при реакції n–ного порядку з концентрацією $c = \Theta$ інтенсивність джерела $Q_\Theta = -kc^n$ й критерію Дамкьоллера становить $Da_0 = \frac{L_0^* k_0^* c_0^{*\,n-1}}{u_0^*}$.

Одна з основних ідей рівняння (12) полягає в тому, що молекули – якщо переважають необхідні значення термодинамічної змінної тиску й температури –

реагують відповідним чином. Отже, клітинні реакції можна моделювати аналогічно [4 ]. 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.

Якщо своєю метою ставити конкретні результати технологічного впливу як, наприклад, інактивація клітинних і молекулярних систем, але становить значну складність не тільки для масштабування, але й для будь-якого спрощення моделювання й імітації. Дотепер використання повного рівняння переносу було відсутнє для скалярних величин. Напроти, відомі численні спрощення, наприклад, застосовувані для опису тимчасової залежності молекулярних і клітинних реакцій. $\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = D_{a0} Q_{\Theta}$ ( 13)

Модель (12) є найчастіше використовуваний математичний вираз [3]. Для спрощення рівняння (12) ми ввели член $\nabla \cdot \left(\Theta \vec{U}\right)$, яким можна врахувати ефект конвекційного переносу Θ через завжди присутнє в рідкому стисненому продукті поле швидкості $\vec{U}$ : $\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \nabla \cdot \left(\Theta \vec{U}\right) = + D_{a0} Q_{\Theta}$ (14)

Викликані під час впливу ВТ поля температури й течії значно впливають на перетворення будь-якого цільового компонента оброблюваного продукту. Так, автори [2 ] показали, що ці поля дійсно значно впливають на інактивацію мікроорганізмів *(Escherichia coli)* і ферментів (*Bacilius subtiiis*α–амілаза) в упакованих харчових продуктах.

**Висновки.** 1. Кінетика біохімічних реакцій залежить від теплової, хімічної й механічної чутливості оброблюваного продукту, від тиску, температури й хімічного потенціалу. 2. Одним з ефективних способів інтенсифікації процесу теплообміну є контактний нагрів продукту за допомогою подачі пари, що здійснює технологічний вплив на оброблювану продукцію.

**Література**

1. Вороненко Б.А. Математическое описание процессов тепло- и массопереноса в колбасных изделиях при их тепловой обработке / Б.А. Вороненко, В.В. Застосування регульованих газових середовищ для підвищення стійкості м’яса / Н.В. Букалова, В.П. Лясота, Т.М. Приліпко // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні тенденції ветеринарної освіти та науки», присвяченої 100-річчю факультету ветеринарної медицини (09 жовтня 2019 року НУБіП України). Київ, 2019. С. 37.
2. І.П. Паламарчук, Ю.А. Полєвода, В.М. Куций. Математичне моделювання процесу тепломасообміну за умов пароконтактної стерилізації продукції у циліндричній тарі. Техніка, енергетика, транспорт АПК, ВНАУ – 2017. – С. 64–70.
3. Г.М Калетнік, ВП Янович. Перспективи розвитку вібраційних машин для первинної обробки сільськогосподарської сировини. ВНАУ. – 2017. – 296 с.