

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ЗА УМОВ ПАРОКОНТАКТНОЇ СТЕРИЛІЗАЦІЇ ПРОДУКЦІЇ У ЦИЛІНДРИЧНІЙ ТАРІ

*Паламарчук Ігор Павлович д.т.н., професор*

*Полевода Юрій Алікович к.т.н., доцент*

*Вінницький національний аграрний університет*

*Куций Віктор Миколайович асистент*

*Подільський державний аграрно-технічний університет*

***Palamarchuk I.***

***Polyevoda Yu.***

*Vinnitsa National Agrarian University*

***Kutsyy V.***

*Podil'iy State Agricultural and Technical University*

**Анотація:** у статті обґрунтовано теплообмінні режимні параметри процесу та визначені закономірності зміни температурних характеристик тиску в робочій зоні в умовах пароконтактного нагріву в тарі. Порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними дозволяє зробити висновок про те, що рішення задачі розрахунку температурного поля продукту дає досить задовільні результати між розрахунковими і експериментальними даними.

**Ключові слова:** теплообмінний режим, температурне поле, стерилізація, пароконтактний нагрів.

### ***Постановка проблеми***

Кінетика біохімічних реакцій різною мірою залежить відповідно від теплової, хімічної й механічної чутливості оброблюваного продукту, від тиску, температури й хімічного потенціалу. Тиск поширюється в рідині за законом Паскаля у всіх напрямках, що супроводжується адіабатичними змінами тиску зі швидкістю звуку. З цієї причини можна припускати, що тиск виникає майже миттєво у всій камері. Таке твердження зумовлює, що дія тиску в порівнянні з термічними процесами змінюється прискорено й одночасно впливає на всю оброблювану речовину незалежно від її форми, розмірів й складу. Проте без уваги залишена можливість фізичної й термічної неоднорідності [1-5].

### ***Аналіз останніх досліджень і публікацій***

Створення високопродуктивного теплообмінного обладнання, що відповідає сучасному рівню розвитку промисловості і техніки, потребує суттєвої інтенсифікації теплообмінних процесів, що достатньо широко реалізовано у відомих наукових школах [6-8]. Серед інтенсифікуючих факторів використовували засоби механічної та вібромеханічної технологічної дії [9, 10], використання інфрачервоного опромінення [10], термічного бароефекту та інші.

Одним з 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.

Теплообмін при пароконтактному нагріванні продуктів являє собою складне явище, пов'язане з одночасним перенесенням теплоти і маси речовини. При цьому кількість перенесеної маси визначається величиною сконденсованої пари, а передана теплота – теплотою пароутворення [1].

Серед найбільш вагомих факторів, що визначають якість пароконтактного нагрівання можна відзначити теплофізичні властивості гріючої пари та фізико-хімічні властивості продукту. Врахування всіх факторів, що впливають на процес теплообміну за даної обробки та їх аналіз є дуже важким не тільки в теоретичному, а й в експериментальному плані.

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.

**Мета роботи** – при дослідженні процесу стерилізації при означеному способі нагріву є визначення температурного поля продукту або виявлення динаміки зміни температури в різних точках продукту в залежності від параметрів пари, що гріє, умов її підведення до продукту та фізичних властивостей оброблюваної сировини.

### ***Методика досліджень***

Нестабільність температурного поля пояснюється тим, що у фазі наростання тиску внаслідок



зміни об'єму збільшується температура оброблюваного середовища. При адіабатичній зміні стану в чистому, інертному й однорідному середовищі відбувається зміна температури відповідно до зміни тиску, що визначається співвідношенням (1):

$$dT = \frac{T \cdot \beta}{\rho \cdot c_p} dp \quad (1)$$

де  $T$  – температура, К;

$\beta$  – коефіцієнт термічного розширення,  $K^{-1}$ ;

$\rho$  – густина рідини (щільність),  $kg/m^3$ ;

$c_p$  – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

$p$  – тиск, Па.

Залежно від оброблюваного продукту при підвищенні тиску на 1 гПа температура піднімається на кілька десятків градусів Цельсія. Заповнена камера високого тиску являє собою систему, що складається із продукту, пакувальних матеріалів, середовища, що передає тиск (проміжної рідини) і сталеві стінки камери. Ці матеріали мають різні теплофізичні властивості. Незважаючи на однорідні початкові параметри розподілу температур, під час підвищення тиску в камері може утворитися неоднорідне температурне поле [2].

Для формального визначення збільшення температури, викликаного підвищенням тиску, ми скористалися спочатку рівнянням збереження, з якого вивели рівняння (2) відносно загальної тепломісткості  $H$ :

$$\frac{d(\rho \cdot H)}{d\tau} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot H) = \frac{dp}{d\tau} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\xi \cdot \vec{v}) + \rho \cdot \vec{q} \cdot \vec{v}, \quad (2)$$

де  $\vec{V}$  – вектор швидкості рідини;

$\vec{q}$  – вектор сили ваги;

$\tau$  – час, с;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К);

$\xi$  – тензор напруг у матеріалі.

Для конкретної тепломісткості  $h$ :

$$\rho \frac{dh}{d\tau} - \frac{dp}{d\tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \eta \cdot \Phi + \rho \cdot \vec{q} \cdot \vec{v}, \quad (3)$$

де  $\Phi$  – функція дисипації;

$r$  – радіус тари, м;

$R_t$  – радіус автоклава, м;

$\eta = \ln(r/R_t)$  – незалежний аргумент шуканої температури.

Далі, використовуючи термодинамічне відношення (4), отримали рівняння теплової енергії (5)

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{dh}{dp} \Big|_T \frac{dp}{d\tau} + \frac{dh}{dT} \Big|_p \frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{\rho} (1 - \alpha \cdot T) \frac{dp}{d\tau} + c_p \frac{dT}{d\tau}, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні циліндра;

$$\rho \cdot c_p \frac{dT}{d\tau} = \alpha \cdot T \frac{Dp}{D\tau} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \eta \cdot \Phi + \rho \cdot \vec{q} \cdot \vec{v}. \quad (5)$$

Останнє рівняння показує, що матеріальною похідною температури  $T$  відносно часу  $\tau$  керує матеріальна похідна тиску  $P$  від часу  $\tau$ , поки функція дисипації  $\Phi$  та потенційна енергія, а також потік, що проводить до високої температури, перебувають на низькому рівні. Враховуючи дану закономірність, наближено отримуємо рівняння переносу теплової енергії:

$$\frac{dT}{d\tau} \approx \frac{dT}{dp} \frac{dp}{d\tau}. \quad (6)$$

Вважається, що рух рідини обов'язково присутній при обробці рідкої речовини тиском. Щоб показати це математично, ми припустили, що щільність зростає зі збільшенням тиску й зменшується зі збільшенням температури, що обґрунтовано для більшої частини харчових продуктів і подібних речовин за даних умов обробки. Появу поля течії в рідині, яка спочатку перебуває у спокої, під час



стиснення ми показали за допомогою рівняння балансу маси:

$$\frac{d\rho}{d\tau} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = 0. \quad (7)$$

Під час фази стиснення щільність зростає зі збільшенням тиску, тому перший член рівняння (7) стає відмінним від нуля. Так як ліва частина повинна дорівнювати нулю, швидкість рідини  $\vec{V}$  має прийняти ненульового значення. Тому, збільшення тиску підсилює рух рідини. Температурні градієнти відіграють важливу роль у відхиленні режиму функціонування потоку від гідростатичного стану. Цей висновок ми простежили, скориставшись основними рівняннями гідростатики:

$$\frac{dp}{dx} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{dp}{dy} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{dp}{dz} = -\rho \cdot \vec{q}. \quad (10)$$

У рівняннях (8-10)  $x$ ,  $y$  і  $z$  є декартівськими координатами. Як припущення ми прийняли, що вектор сили ваги вказує в негативному  $z$  напрямку. Подальше перетворення рівняння (9) у відношенні й рівняння (10) у відношенні дали такий результат:

$$\frac{d^2 p}{dydz} = \frac{d^2 p}{dzdy} = -\frac{d\rho}{dy} \vec{q}. \quad (11)$$

Отже, права частина рівняння (11) і похідна щільності у відношенні має бути постійною й дорівнювати нулю:

$$\frac{d\rho}{dy} = 0. \quad (12)$$

Але, ця умова, як впливає з гідростатики, не може зберігатися. Поки щільність є функцією температури, а остання піддається передачі в напрямку, відмінному від напрямку вектора сили ваги, рівняння (12) порушується. Як наслідок, обов'язково має з'явитися потік пари зі швидкістю, відмінною від нуля, що приводить до конвективної передачі високої температури й завислих речовин.

Для розробленої схеми автоклава, коли нагрівання здійснюється парою зовні розміщеної банки, завдання зводиться до розрахунку нестационарного температурного поля в тарі, що нагрівається зі зовнішньої поверхні від джерела теплоти заданої інтенсивності з урахуванням конвекції в радіальному напрямку.

Передбачається, що термічний опір зовнішньої стінки відносно малий, а теплофізичні властивості матеріалу не залежать від температури. Звідси рівняння теплопровідності з урахуванням конвективної складової має вигляд [3]:

$$\frac{dt}{d\tau} + u \frac{dt}{dr} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho \cdot r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dt}{dr} \right), \quad (13)$$

де  $u$  – швидкість руху рідини м/с.

Для даного рівняння умови однозначності:

– початкові умови при  $\tau = 0$

$$t(r, 0) = t(r) = t_n; \quad (14)$$

– граничні умови

$$\left( \frac{dt}{dr} \right)_{r=R_1} = -q / \lambda; \quad (15)$$

$$\left( \frac{dt}{dr} \right)_{r=R_2} = -a \cdot (t - t_e) / \lambda - \frac{q_2}{\lambda}; \quad (16)$$

де  $u$  – швидкість руху рідини м/с;

$t_e$  – температура навколишнього середовища, К;

$t_n$  – початкова температура матеріалу, що обробляється, К;

$q$  – питомий тепловий потік на внутрішній поверхні автоклава, Вт/м<sup>2</sup>;

$R_2$  – радіус тари, м.

**Результати досліджень**

Оскільки ми розглядаємо задачу розрахунку температурного поля в залежності від радіуса автоклава, то передбачається, що питомий тепловий потік і швидкість руху пари через поверхню тари не залежить від її довжини і тим самим не враховується граничний ефект, що спостерігається через кінцеві розміри тари.

З урахуванням вищевикладеного визначимо зв'язок між швидкістю і питомим тепловим потоком. При пароконтактному нагріві пара подається рівномірно і питомий тепловий потік буде рівний:

$$q_1 = G_n \cdot i_x / 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot l, \quad (17)$$

де  $G_n$  – витрати пари, кг/с;

$i_x$  – ентальпія пари, Дж/кг;

$l$  – довжина тари, м.

Фактичну кількість пари, що створює конвективний потік, можна визначити з рівняння теплового балансу:

$$G_n \cdot i_x = G_k \cdot t_n \cdot c_k, \quad (18)$$

де  $G_k$  – кількість новоутвореного конденсату, кг/с;

$c_k$  – питома масова теплоємність конденсату, Дж/(кг К).

Швидкість руху пари в автоклаві з радіусом  $r$  визначається за формулою:

$$u = G_n / 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot \rho_n, \quad (19)$$

де  $\rho_n$  – густина пари.

Враховуючи підстановки (17) в (18) і (18) в (13), отримаємо:

$$\frac{dt}{d\tau} = \left( \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} - \frac{G_n}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \rho} \right) \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} + \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \cdot \frac{d^2 t}{dr^2}, \quad (20)$$

$$\left( \frac{dt}{dr} \right)_{r=R_1} = \frac{G_n \cdot c_p \cdot t_n}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot \lambda \cdot l}, \quad (21)$$

$$\left( \frac{dt}{dr} \right)_{r=R_2} = -\frac{a}{\lambda} (t - t_g) + \frac{G_n \cdot c_p \cdot t}{4 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot \lambda \cdot l}, \quad (22)$$

$$t(r, 0) = t_n. \quad (23)$$

Рівняння (17–22) запишемо в параметричному вигляді. В якості характеристичних параметрів введемо наступні безрозмірні величини:

$\theta = t / t_n$  – шукана безрозмірна величина;

$\theta_g = t_g / t_n$  – безрозмірна величина навколишнього середовища;

$F_o = \tau \cdot \lambda / c_p \cdot \rho \cdot R_1^2$  – число Фур'є;

$B_i = a \cdot R_1 / \lambda$  – число Біо.

$$Q_1 = G_{жк} \cdot c_p / 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda; \quad \eta_2 = \ln(R_2 / R_1). \quad (24)$$

З врахуванням введених безрозмірних величин рівняння (20–23) набудуть вигляду:

$$\frac{d\theta}{dF_o} = \exp(-2 \cdot \eta) \left[ (1 - Q_1) \frac{d\theta}{d\eta} + \frac{d^2 \theta}{d\eta^2} \right], \quad (25)$$

$$\left( \frac{d\theta}{d\eta} \right)_{\eta=0} = Q_1, \quad (26)$$

$$\left( \frac{d\theta}{d\eta} \right)_{\eta_2=0} = \left[ B_i (\theta_g - \theta) - Q_1 \cdot R_1 \cdot \frac{\theta}{R_2} \right] \exp \eta_2, \quad (27)$$

$$t(\eta_1, 0) = 1. \quad (28)$$

Математична модель із врахуванням граничних умов становить систему диференціальних рівнянь (25)–(28), рішення якої має вигляд [4]:



$$\theta = \theta(F_0, B_i, \eta, Q_1, \frac{R_1}{R_2}) \quad (29)$$

Таким чином, математичною моделлю визначення динаміки температурного поля в тарі є знайдена залежність (29), яка задовільняє умови області  $D\{(F_0, \eta); 0 \leq F_0 \leq \phi; 0 \leq \eta \leq \eta_2\}$  рівняння (25) та граничним (26, 27) і початковим умовам (28) відповідно.

Для вирішення даного завдання застосовуємо чисельний метод [5]. Для чого побудуємо рівномірну просторово-часову сітку з кроком:

$$\Delta\eta = \eta_2 / N, \quad (30)$$

де  $N$  – число квантування заданої області з кроком  $\Delta F_0 = \Phi_1 / M$ ;

$M$  – кількість поділів заданої області, шт.;

$\Phi_1$  – заздалегідь задане число Фур'є (час).

Використовуючи звичайну неявну різничну схему апроксимації, рівняння (25–27) набуде вигляду:

$$\theta_{i,j} - \theta_{i,j-1} = \Delta F_0 \exp(-2\eta_i) \left[ (1 - \theta_1)(\theta_{i+1,j} - \theta_{i-1,j}) / 2\Delta\eta + (\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j}) \right] \Delta\eta^2 \quad (31)$$

де  $(i = 1, 2, 3 \dots N - 1, j = 1, 2, 3 \dots M)$ .

$$\theta_{1,j} - \theta_{0,j} = \theta_1 \Delta\eta, \quad (32)$$

$$\theta_{N,j} - \theta_{N-1,j} = \Delta\eta \cdot \exp\eta_2 \left[ B_i(\theta_g - \theta_{N,j}) - Q_1 \theta_{N,j} \cdot R_1 / R_2 \right] \quad (33)$$

Перепишемо рівняння (29, 31, 32) у вигляді:

$$-A_i \theta_{i-1,j} + C_i \theta_{i,j} - B_i \theta_{i+1,j} = f_i \quad (i = 0, 1, 2, 3 \dots N), \quad (34)$$

де  $C_o, B_o, f_o, A_N, C_N, f_N$ , – коефіцієнти, що описують граничні умови;

$\theta_{i,j}$  – залежна функція;

$A_i, B_i, C_i, f_i$  – коефіцієнти рівняння енергії.

Відповідно (25-28), вираз для коефіцієнтів системи (33) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} A_o &= 0; C_o = 1; B = -1; f_o = -Q_1 \Delta\eta; \\ A_i &= \Delta F_o \exp(-2 \cdot \eta_i) \left[ (\Delta\eta^{-2} + 0,5 \cdot Q_1 \cdot \Delta\eta^{-1}) \right]; \\ B_i &= \Delta F_o \exp(-2 \cdot \eta_i) \left[ (\Delta\eta^{-2} + 0,5 \cdot Q_1 \cdot \Delta\eta^{-1}) \right]; \\ C_i &= 1 + 2\Delta F_o \Delta\eta^{-2} \exp(-2 \cdot \eta_i); \\ f_i &= \theta_{i,j-1}; \end{aligned} \quad (35)$$

$$A_N = 1; C_N = 1 + \Delta\eta \exp\eta_2 (B_i + Q_1 \cdot \frac{R_1}{R_2});$$

$$B_N = 0; f_N = B_i \theta_x \Delta\eta \exp\eta_2.$$

Таким чином, за допомогою лінійної апроксимації шуканої функції гранична задача зведена до системи алгебраїчних рівнянь.

Для вирішення цієї системи застосуємо метод прогонки. При цьому рішення граничної задачі на  $j$ -му часовому шарі визначається співвідношенням:

$$\theta_{1,j} = a_{i+1,j} \theta_{i+1,j} + \beta_{i+1,j}, \quad (36)$$

де  $a_{i+1,j}, \beta_{i+1,j}$  – прогоночні коефіцієнти, що визначаються рекурентними формулами.

$$a_o = B_o / C_o; \beta_o = f_o / C_o; a_{i+1,j} = \frac{B_i}{(C_i - A_i a_i)}; \beta_{i+1,j} = \frac{f_i + A_i \beta_i}{(C_i - A_i a_i)}. \quad (37)$$

Зауважимо, що вираз для  $\theta$  в точці  $(N, j)$  відповідно (34) з врахуванням (36) набуде вигляду:

$$\theta_{N,j} = \beta_N \quad (38)$$

Знайдено зміну температурного поля продукту при пароконтактному нагріванні продукту від початкової температури  $t_n = 50^\circ\text{C}$  до кінцевої  $t_{n\kappa} = 100^\circ\text{C}$  конденсуючим паром з температурою  $t_n = 100^\circ\text{C}$ , при витраті пари рівному  $0,001 \text{ кг/с}$ . Температура навколишнього середовища була прийнята  $t_g = 20^\circ\text{C}$ , а коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні циліндра  $a = 10$ . При цьому в периферійних шарах продукту температура практично не змінюється.



При подальшому нагріванні, переважно за рахунок виникаючих радіальних конвективних потоків, а також теплопровідності, тепловий потік поступово досягає периферійних шарів протягом часу  $\tau = 260$  с. В результаті по всьому радіусу встановлюється рівномірне температурне поле. Для з'ясування впливу параметрів гріючої пари на розподіл температурного поля продукту нами проведено розрахунки при різних температурах пари.

Знайдено зміни температурного поля при температурі гріючої пари  $t_n = 110^\circ\text{C}$ . Підвищення температури сприяє інтенсифікації процесу теплопередачі. Разом з тим, це призводить до появи різко вираженого перепаду температури між центральними і периферійними областями.

### Висновки

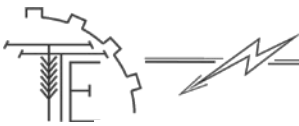
1. Наявність теплової неоднорідності у харчовому продукті та її подальше зростання зумовлює необхідність її прогнозування та пошуків заходів протидії, що ефективно реалізується в процесі пароконтактної стерилізації.
2. При математичному моделюванні пароконтактного нагрівання продукції при стерилізації були складені відповідні рівняння теплообміну, що враховують такі фактори, як зміна температури, тиску, швидкість течії рідини та основні фізико-механічні властивості взаємодіючих середовищ.
3. За використанням методів чисельного аналізу були знайдені залежності змінних параметрів температурного поля, що дозволили виявити необхідні умови для інтенсифікації теплообміну в процесі пароконтактної стерилізації, що дозволяє виявити ефективні робочі режими даної обробки.

### Список літератури

1. Вороненко Б. А. Математическое описание процессов тепло- и массопереноса в колбасных изделиях при их тепловой обработке / Б. А. Вороненко, В. В. Пелененко, В. В. Стариков // Процессы и аппараты пищевых производств – 2008. – № 2. – С. 27–30.
2. Нечепуренко И. П. Кинетика процесса стерилизации консервов в стерилизаторе непрерывного действия / И. П. Нечепуренко // Всесоюзная научно-техническая конференция "Холод – народному хозяйству" : тезы докладов. – Л. : ЛТИХП. – 1991. – С. 268–269.
3. Туголуков Е. Н. Методика математического моделирования нестационарных температурных полей емкостного аппарата / Е. Н. Туголуков // Химическая промышленность. – 2004. – т. 81. – № 2. – С. 84–92.
4. Беляева М. А. Математическое моделирование технологических процессов пищевых производств / М. А. Беляева. – Ташкент. : Издательство Ташкентского химико-технологического института, 2003. – 168 с.
5. Паштет консервованих із м'яса індиків "Подільський" : ТУ У 10.1-22769675-001:2013. – Львів : ТК № 132 Держспоживстандарту України, 2013. – 10 с.
6. Цуркан О. В. Обґрунтування технологічної та конструктивної схеми автоклава з аеродинамічним інтенсифікатором / О. В. Цуркан, А. Ю. Гурич, Ю. А. Полевода // Наукові пр. ОНАХТ. – Одеса. – 2015. – Вип. 46. Т. 2. – С. 312–314.
7. Терзиев С. Г. Кинетика экстрагирования из шлама кофе при микроволновом подводе энергии / С. Г. Терзиев, Т. Л. Макиевская, Н. В. Ружицкая // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса. – 2014. – Вип. 46. Т. 2. – С. 300–303.
8. Терзиев С. Г. Электродиффузионная модель тепломассопереноса в термосифонных аппаратах / С. Г. Терзиев, О. М. Кураков // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса. 2012. – Вип. 41. Т. 1. – С. 219–222.
9. Паламарчук І. П. Науково-технічні основи розроблення енергозберігаючих вібромашин механічної дії харчових і переробних виробництв : дис. доктора техн. наук : 05.18.12 / Паламарчук Ігор Павлович. – Київ, 2008. – 461 с.
10. Терзієв С. Г. Дослідження процесу сушіння шламу кави під дією інфрачервоного випромінювання / С. Г. Терзієв, С. А. Малашевич, Н. В. Ружицька // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, – Львів. 2011. – Т. 13. № 4 (50), Ч. 4. – С. 131–134.

### References

1. Voronenko B. A. Matematycheskoe opysanye protsessov teplo- y massoperenosa v kolbasnyikh yzdelyakh pry ykh teplovoi obrabotke / B. A. Voronenko, V. V. Pelenenko, V. V. Starykov // Protsessyi y apparaty pyshchevyikhproyzvodstv – 2008. – № 2. – S. 27–30.
2. Nechepurenko I. P. Kinetika protsesssa sterilizatsii konservov v sterilizatore nepreryivnogo deystviya / I. P. Nechepurenko // Vsesoyuznaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Holod – narodnomu hazyaystvu" : tezyi dokladov. – L. : LTIHP. – 1991. – S. 268–269.
3. Tugolukov E. N. Metodika matematicheskogo modelirovaniya nestatsionarnyih temperaturnih poey emkosnogo aparata / E. N. Tugolukov // Himicheskaya promyishlennost. – 2004. – t. 81. – № 2. – S. 84–92.
4. Belyaeva M. A. Matematicheskoe modelirovanie tehnologicheskikh protsessov pischevyih proizvodstv / M. A. Belyaeva. – Tashkent. : Izdatelstvo Tashkentskogo himiko-tehnologicheskogo instituta, 2003. – 168 s.
5. Pashtet konservovanyi iz miasa indykiv "Podilskyi" : TU U 10.1-22769675-001:2013. – Lviv : TK № 132 Derzhspozhyvstandartu Ukrainy, 2013. – 10 s.



6. Tsurkan O. V. *Obhruntuvannia tekhnolohichnoi ta konstruktyvnoi skhemy avtoklava z aerodynamichnym intensyfikatorom* / O. V. Tsurkan, A. Yu. Hurych, Yu. A. Polievoda // *Naukovi pr. ONAKhT*. – Odesa. – 2015. – Vyp. 46. T. 2. – S. 312–314.
7. Terziev S.G. *Kinetika ekstragirovaniya iz shlama kofe pri mikrovolnovom podvode energii* / S. G. Terziev, T. L. Makievskaya, N. V. Ruzhitskaya // *Nauk. pr. ONAHT*. – Odesa. – 2014. – Vip. 46. T. 2. – S. 300–303.
8. Terziev S. G. *Elektrodiffuzionnaya model teplomassoperenosa v termosifonnyih apparatah* / S. G. Terziev, O. M. Kurakov // *Nauk. pr. ONAHT*. – Odesa. 2012. – Vip. 41. T. 1. – S. 219–222.
9. Palamarchuk I. P. *Naukovo-tekhnichni osnovy rozroblennia enerhozberihaiuchykh vibromashyn mekhanichnoi dii kharchovykh i pererobnykh vyrobnytstv : dys. doktora tekhn. nauk : 05.18.12* / Palamarchuk Ihor Pavlovych. – Kyiv, 2008. – 461 s.
10. Terziiev S. H. *Doslidzhennia protsesu sushinnia shlamu kavy pid diieiu infrachervonoho vuprominiuvannia* / S. H. Terziiev, S. A. Malashevych, N. V. Ruzhytska // *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii im. S. Z. Gzhytskoho*, – Lviv. 2011. – T. 13. № 4 (50), Ch. 4. – S. 131–134.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА В УСЛОВИЯХ ПАРОКОНТАКТНОЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ ПРОДУКЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТАРЕ

**Аннотация:** в статье обосновано теплообменные режимные параметры процесса и определены закономерности изменения температурных характеристик давления в рабочей зоне в условиях пароконтактного нагрева в таре. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о том, что решение задачи расчета температурного поля продукта дает достаточно удовлетворительные результаты между расчетными и экспериментальными данными.

При математическом моделировании пароконтактного нагрева продукции при стерилизации были составлены соответствующие уравнения теплообмена, учитывающие такие факторы, как изменение температуры, давления, скорость течения жидкости и основные физико-механические свойства взаимодействующих сред.

**Ключевые слова:** теплообменный режим, температурное поле, стерилизация, пароконтактный нагрев.

### MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF EVAPORATION IN TERMS PARACONTACT STERILIZATION IN CYLINDRICAL CONTAINERS

**Summari:** in the article, we sustained the heat exchange process and regime parameters and defined the changing patterns of temperature characteristics of the pressure in the working area in terms of vapourcontacting heating in container. Comparison of computer results with experimental data leads to the conclusion that the solution of the problem of computer calculation the temperature field of product gives very satisfactory results between the calculated and experimental data.

In mathematical modeling vapour-contacting heating products during sterilization had composed the heat equation, taking into account factors such as changes in temperature, pressure, fluid flow rate and the basic physical and mechanical properties of interacting environments.

**Keywords:** heat exchanger mode, temperature field, sterilization, vapour-contacting heating.