УДК 664.9

Федишин Я. І., к.ф.-м.н., професор ©
ЛНУВМБ ім. С.З. Гжицького, Львів, Україна
Гембара Т.В., к.т.н., доцент (taras.gembara.@ gmail.com.)
ЛНУ «Львівська політехніка», Львів, Україна
Федишин Т.Я., к.вет.н., доктор філософії

АЛГОРИТМИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИМ ПРОЦЕСОМ СТЕРИЛІЗАЦІЇ

Розроблено алгоритми визначення температурно-часових режимів стерилізації. Запропоновано методика розв'язку задачі оптимального управління технологічним теплофізичним процесом стерилізації в автоклавах неперервної дії в умовах випадкових збурюючих факторів впливу. Відповідно запропоновано температурно-часові режими стерилізації за обчисленими математичними сподіваннями та середніми квадратичними відхиленнями. Такі ж ймовірнісні величини встановлено для харчової цінності та органолептичних властивостей м'ясних консервів при заданих температурно-часових режимах стерилізації.

Ключові слова: *алгоритм, управління, ймовірність, математичне сподівання, середнє квадратичне відхилення, витрати тепла, харчова цінність, органолептичні властивості, теплопровідність, стерилізація, збурення.*

УДК 664.9

Федишин Я. И., к.ф.-м.н., профессор
ЛНУВМБ им. С.З. Гжицкого, Львов, Украина
Гембара Т.В., к.т.н., доцент
ЛНУ «Львовская политехника», Львов, Украина
Федишин Т.Я., к.вет.н., доктор философии

АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ СТЕРИЛИЗАЦИИ

Разработаны алгоритмы определения температурно-временных режимов стерилизации. Предложено методика решения задачи оптимального управления технологическим теплофизическим процессом стерилизации в автоклавах непрерывного действия в условиях случайных возмущающих факторов влияния. Согласно предложено температурно-временные режимы стерилизации по вычисленным математическими ожиданиями и средними квадратичными отклонениями. Такие же вероятностные величины установлены для пищевой ценности и органолептических свойств мясных консервов при заданных температурно-временных режимах стерилизации.

Ключевые слова: *алгоритм, управления, вероятность, математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение, расхода тепла, пищевая*

© Федишин Я. І., Гембара Т.В., Федишин Т.Я., 2014

ценность, органолептические свойства, теплопроводность, стерилизация, возмущения.

UDC 664.9

Fedyshyn Y., Ph.D., Professor
LNUVMB them. SZ Gzhytskiy, Lviv, Ukraine
Hembara T., Ph.D., Associate Professor
NUL "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine
Fedyshyn T., k.vet.n., Ph.D.

OPTIMAL CONTROL ALGORITHMS THERMOPHYSICAL STERILIZATION PROCESS

The algorithms of determination of the temperature-time modes of sterilization was developed. It is offered method of decision of task of optimum technological thermophysical process control of sterilization in the autoclaves of continuous action in the conditions of casual revolting factors of influence. The temperature-time modes of sterilization on the base of calculated mathematical hopes and standard deviations was proposed. The same probabilistic values are set for a food value and organoleptic properties of bully beeves at the set temperature-time modes of sterilization.

Key words: *algorithm, management, probability, expected value, standard deviation, heat consumption, nutritional value, organoleptic properties, thermal conductivity, sterilization, perturbation*

Вступ. Для задач стерилізації м'ясних консервів розв'язано ряд задач математичного моделювання [1-9], запропоновані методи математичної теорії оптимального управління [1]. Збурення технологічного процесу нагрівання м'ясних консервів в автоклаві часто, з точки зору оптимального управління, мають ймовірнісну природу - це дані ветеринарно-санітарної експертизи сировини, її теплофізичні властивості, початкова температура м'ясних консервів. Для встановлення якісних алгоритмів управління потрібно враховувати значну кількість стохастичних факторів: статистичну динаміку процесу, ймовірнісні характеристики вихідних величин, що визначають мікробіологічну безпеку та харчову цінність, а також особливості розподілу температурного поля, викликані складними теплофізичними процесами всередині продукту, які через складність не піддаються точній оцінці. Зокрема представляє науково - практичний інтерес проблема врахування термодифузійних явищ при нагріванні, що пов'язане з підвищеними вимогами до адекватності та верифікації математичних моделей. В данному випадку важливою є хоча б наближена оцінка похибки визначення температурного поля за класичним рівнянням теплопровідності, порівняно із врахуванням термодифузії. Якщо кількість керуючих змінних не менша за кількість вимог на параметри кінцевого продукту, то для таких об'єктів можна сформулювати і розв'язати задачу оптимального управління. Для процесу стерилізації м'ясних консервів є можлива постановка задачі оптимального управління, якщо прийняти вимоги до обмежень температури на поверхні і в центрі консервів.

При тому ставиться завдання мінімізації енерговитрат при забезпеченні заданих кваліметричних характеристик та мікробіологічної безпеки.

Матеріали і методи. Методи математичної теорії управління, чисельні методи мінімізації функціонала.

Результати дослідження. Основні критерії управління нагрівання робочого середовища автоклаву в умовах випадкових збурюючих факторів використано з роботи [1]:

1) забезпечення максимуму ймовірності потрапляння температурного розподілу $T(x,l_n)$ отриманого після завершення технологічного процесу стерилізації консервів в автоклаві в задану множину кінцевих станів Φ:

$$\max \ P[T(x,l_n) \in \Phi], \tag{1}$$

де Φ визначається за співвідношенням:

$$\Phi = \{T(x,l_n): T_m \le T(S,l_n) \le T_M, \Delta T(x,l_n) \le \Delta T\}; \tag{2}$$

2) мінімізація математичного сподівання квадратів відхилень параметрів (обраних) температурного розподілу від заданих величин:

$$\min\{m_1 M[(X_1 - X_1^*)^2] + m_2 M[(X_2 - X_2^*)^2]\}, \tag{3}$$

де обраними X_1, X_2 можуть бути температура поверхні і температурний перепад, середня температура консерви і температурний перепад та ін.; X_1^*, X_2^* - задані значення параметрів.

Математичне сподівання квадрата відхилення випадкової величини від заданої встановлене співвідношенням:

$$M[(X - X^*)^2] = D_x + (m_x - X^*)^2, \tag{4}$$

D_x, m_x - відповідно дисперсія і математичне сподівання випадкової величини X.

При сталому коефіцієнті теплопровідності із врахуванням нестаціонарності температурного поля розподіл температури можна описати відомим рівнянням теплопровідності [8] :

$$c\rho \frac{dT}{dt} = div(\lambda grad T), \tag{5}$$

де c - питома теплоємність; ρ - густина; T - температура; t - час; λ - коефіцієнт теплопровідності.

При цьому підвищення і пониження температури всередині продукту супроводжується переміщенням рідкої фази, що приводить до зміни кількості тепла в системі. Отже необхідно враховувати і молекулярне перенесення тепла, яке виникає за рахунок дифузійних і фільтраційних процесів. Враховуючи процеси масообміну рівняння (5) прийме вигляд:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = div(\lambda gradT) + A_n u_n \frac{\partial W}{\partial t} - c_p \rho_p v_p gradT\,, \quad (6)$$

де u_n - питома теплота фазового перетворення (питома теплота випаровування або питома теплота плавлення жирів); W - об'ємна концентрація рідини в тілі (масса рідини в одиниці об'єму пористого тіла); A_n - коефіцієнт(при випаровуванні або конденсації пари дорівнює критерію фазового переходу); ρ_p, c_p - відповідно густина і питома теплоємність рідини; v_p - лінійна швидкість руху рідини (газу).

Для розв'язання рівняння (6) необхідно знати кількість тепла, яке приймає участь у теплообміні із системою за рахунок фазових перетворень $\left(\frac{\partial W}{\partial t}\right)$. Цю величину визначають із диференціального рівняння масопереносу:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = div(a_m gradW + a_m \delta gradT) + A_n \frac{\partial W}{\partial t}, \quad (7)$$

де a_m - коефіцієнт потенціалопровідності массопереносу; δ - термоградієнтний коефіцієнт.

Таким чином, дія тепла приводить до появи у загальному випадку нестаціонарних потоків тепла і речовини, включаючи потік газів (зокрема і водяної пари). Чисельний аналіз наближеного визначення температурного поля з використанням теплофізичних даних [3, 6,7] вказав, що відносна похибка (заниження) при обчисленні температур за рівністю (5) до 130 ℃ не перевищує 6%, а при 110℃ не перевищує 3% і стрімко зменшується із зниженням температури.

Необхідні для вимог оптимальності процесу питомі витрати тепла ΔQ на нагрівання консервів циліндричної чи прямокутної форми використаємо з роботи [1].

Задача управління технологічним процесом нагрівання в автоклаві в умовах імовірнісних збурень полягає в наступному: задані ймовірнісні характеристики збурюючи впливів (одномірні закони розподілу), необхідно визначити вектор управління при обмеженнях

$$V; V^m{}_i \le V_i \le V^M{}_i; i = 1, n\,, \quad (8)$$

де $V^m{}_i$, $V^M{}_i$ - відповідно мінімально і максимально допустимі температури в i-тих зонах автоклава згідно відповідних умов [1]. При розв'язку сформульованої задачі управління кінцевим станом можуть бути два мінімума

критерію якісного нагрівання:

$$\min Y = m_1 M[(T_n - T_з)^2] + m_2 M[(\Delta T - \Delta T_з)^2], \qquad (9)$$

де M - математичне сподівання; m_1, m_2 - вагові коефіцієнти; $T_n, T_з$ - температура поверхні (розглядається як випадкова) і відповідна задана температура поверхні; $\Delta T, \Delta T_з$ - температурний перепад (розглядається як випадковий) і відповідний заданий температурний перепад. Відповідно перша стратегія управління полягає в тому, що керуючі впливи залишаються сталими протягом всього процесу нагрівання. При цій стратегії визначається мінімум функціонала (9), який знаходимо градієнтним методом. Друга стратегія полягає в тому, що керуючі впливи вибираються залежно від актуальних значень вхідних величин, що постійно змінюються, це можуть бути мікробіологічні показники, харчова цінність та органолептичні властивості. Хоча ця стратегія більш приваблива, але її цілковита реалізація наразі технічно неможлива, хіба що за використання актуальних розрахункових даних, що зменшує точність такої стратегії. Для розрахунку алгоритмів управління використано дані роботи [1], представлені в таблиці

Таблиця

Алгоритми управління режимів термічної стерилізації

Температура стерилізації T_c, °С	Час стерилізації t, хв	t у хв, за попередньої стерилізації пряно-щів	Харчова цінність консервів (відносна біологічна цінність за лабільністю білків до ферментативного гідролізу) у с	Коефіцієнт оцінки органолептичних властивостей у с	Зменшення прямих витрат тепла на нагрівання 1 кг консер-вів у МДж
112 (2)	108(3)	102	1168	1975	7,83
113(2)	107(3)	102	1214	2010	7,02
114(2)	105(4)	101	1252	2133	6,97
115(3)	103(4)	99	1321	2464	6,02
116(3)	99(4)	95	1321	2528	5,78
117(3)	96(5)	93	1420	2688	4,65
118(3)	94(5)	92	1482	2920	3,8
119(4)	92(5)	90	1544	3179	2,34
120(4)	90(5)	91	1616	3473	1,02
121(4)	88(6)	88	1679	3804	0,00

Для температурно-часових режимів стерилізації у таблиці вказано математичні сподівання температури та часу, а у дужках вказано середні квадратичні відхилення стерилізації цих величин, заокруглені відповідно до градуса і хвилини. Спостерігається співпадіння з результатами роботи [1], однак отримані нові результати якісно і кількісно свідчать додатково про необхідність відповідних корекцій температурно-часових режимів, особливо, якщо на меті підвищення температури стерилізації, або зменшення тривалості процесу.

Висновки. Розроблено метод управління температурно-часовим режимом стерилізації на основі стохастичної комплексної оцінки його ефективності. Для

стохастичної оцінки передбачене використання попередніх статистичних даних санітарно-мікробіологічних показників м'ясних консервів, задані кваліметричні характеристики та витрати теплової енергії на стерилізацію. Розглянуто можливості використання різних стратегій управління. Розроблена якісна порівняльна оцінка обчислення температурного поля із врахуванням теплофізичних особливостей поширення тепла в м'ясопродуктах. Отримані розрахункові табличні дані дозволяють для інженерної практики визначати алгоритми температури стерилізації із статистичними поправками на час стерилізації та навпаки. При тому розрахована вихідна оцінка харчової цінності, органолептичних властивостей та питомих енерговитрат.

Література

1.Федишин Я.І. , Гембара Т.В., Федишин Т.Я. Оптимальне управління теплофізичним процесом стерилізації за мінімізацією прямих питомих теплових витрат із забезпеченням харчової цінності.// Науковий вісник ЛНУВМ та БТ ім.С.З. Гжицького – 2013. – Том 15, №1, Частина 2. – с. 190-196.

2. Федишин Я.І. , Гембара Т.В., Федишин Т.Я. Дискретне математичне моделювання теплофізичного процесу стерилізації із застосуванням модифікованих біофізичних характеристик термостійкості та летальності // Науковий вісник ЛНУВМ та БТ ім.С.З. Гжицького – 2012. – Том 14, №2, Частина 3. – с. 276-281.

3. Zee Jun Ho, Singh Raresh K., Larkin John W. Determination of lethality and processing time in a continuous sterilization system containing particulates // J. Food Eng. – 1990. – Vol. **11**, №1. – P. 67-92.

4. Бурдо О.Г., Федишин Т.Я., Гембара Т.В., Демків Т.М. Використання закону Арреніуса для теплофізичного розрахунку процесу стерилізації м'ясних консервів // Наукові праці Одеської держ. академ. харч. технол. – 2001. – Вип.22. – С.152-159.

5. Математические модели и ЭВМ в микробиологической практике / Ю.П. Малаленко, Ф.В. Мушин, В.А. Романовская и др./ Отв. Ред. В.И. Максимов, Р.И. Гвоздяк. - Киев: Наук. Думка, 1980. – 195с.

6. Соколов А.А., Адонин А.Л., Исаев М.К., Гущин Б.П. Определение пищевой ценности мясных продуктов при термической обработке // Мясная индустрия СССР. – 1980. – №10. – С. 38-39.

7. Wang H., Li G., Lei Y., Zhao Y., Dai Q., Wang J. Mathematical heat transfer model research for the improvement of continuous casting slab temperature // The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ) International. – 2005. – Vol.45, №9. – P. 1291—1296.

8. Аналітичний розрахунок температурно-часових режимів стерилізації м'ясних консервів / Р.Й. Кравців, Я.І. Федишин, Т.М. Гембара, Т.М. Демків. – Л: "Світ", 1998. – 80 с.

9. Гембара Т.В., Федишин Я.І., Федишин Т.Я. Управління тепловою обробкою м'яса за параметрами біологічної цінності // Науковий вісник ЛДАВМ ім. С.З. Гжицького. – Львів – 2003. – Т.5, №1. – С. 149 – 152

Рецензент – д.т.н., професор Ціж Б.Р.