

УДК 664.951.6

Оптимизация процесса стерилизации консервов в водной среде в автоклаве АВК-30М

А.В. Кайчен¹, А.А. Маслов¹, А.В. Власов¹, А.Р. Власова¹,
А.И. Прыгунов²

¹ *Политехнический факультет МГТУ, кафедра автоматике
и вычислительной техники*

² *Политехнический факультет МГТУ, кафедра технической механики*

Аннотация. С помощью моделирования процесса стерилизации оптимизированы формула стерилизации консервов из гидробионтов, а также параметры регуляторов температуры стерилизованной установки АВК-30М. Оптимизированный процесс стерилизации позволяет получить экономию электроэнергии до 20 % и сократить временные затраты на 9 %.

Abstract. Sterilization formula of canned food made of hydrobionts and coefficients of the temperature regulators in the sterilizer AVK-30M has been optimized using modeling of the sterilization process. Optimized sterilization process decreases electric power consumption by 20 % and process length by 9 %.

Ключевые слова: автоматика, стерилизация, автоклав, оптимизация
Key words: automatic machinery, sterilization, autoclave, optimization

1. Введение

Обеспечение населения качественными и безопасными продуктами из гидробионтов является стратегической задачей рыбной отрасли России. Создание новых видов консервов, применение новых видов консервной тары требуют разработки научно обоснованных формул стерилизации, утверждаемых затем в установленном порядке. Разработка режима стерилизации зачастую требует использования значительных энергетических, материальных и временных ресурсов. Трудоёмкость его разработки обусловлена проведением большого количества автоклавоварок, необходимых для получения и утверждения режимов стерилизации. Очевидно, что упрощение процедуры разработки возможно при использовании метода температурного моделирования. При этом для получения модели процесса, представляющей совокупность температурных моделей стерилизатора и продукта, можно значительно сократить количество необходимых автоклавоварок.

Моделирование процесса позволит повысить эффективность стерилизационных установок, сократить расход ресурсов на процесс стерилизации, повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции, уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду. Использование адекватных моделей позволит получить оптимальный температурно-временной режим стерилизации. Процесс стерилизации, проводимый на основании оптимальной формулы стерилизации, а также с возможностью регулирования фактического стерилизующего эффекта отличается от традиционного и был назван "модернизированный" (Власов, Кайчен, 2008; Кайчен и др., 2011а).

2. Описание объекта

Математическое описание стерилизационной установки АВК-30М для проведения традиционного процесса стерилизации консервов из гидробионтов (на примере консервов "Печень трески натуральная") получено для этапов нагрева и собственно стерилизации в виде структурных схем автоматического регулирования температуры стерилизационной камеры и температуры парогенератора (Кайчен и др., 2011б).

Модель модернизированного процесса стерилизации получена на основе математического описания традиционного процесса. Структурная схема представлена на рис. 1.

Структурная схема состоит из пяти блоков. Блок регулирования температуры стерилизационной камеры (блок 3) включает в себя контур регулирования температуры на этапах нагрева и собственно стерилизации.

Блок расчета $T_{пр}^*$ (блок 4) представлен на рисунке передаточной функцией $W_{прод}$, полученной на основании теплофизических исследований консервов "Печень трески натуральная". В блоке расчета L (блок 5) выполняется вычисление фактического стерилизующего эффекта, в соответствии с текущей температурой $T_{пр}^*$.



Рис. 1. Структурная схема контура регулирования фактического стерилизующего эффекта в АВК-30М при модернизированном способе стерилизации

Блок 2 структурной схемы содержит оптимальную формулу стерилизации (о.ф.с.). На процесс управления модернизированным способом стерилизации накладываются два ограничения. В связи с тем, что консервы "Печень трески натуральная" стерилизуют традиционным способом при максимальной температуре 120 °С, температура стерилизационной камеры не должна превышать это значение. Во-вторых, температура продукта не должна превышать 115 °С, в связи с тем, что на продукт оказывается меньшее тепловое воздействие при меньших температурах, а это позволяет сохранить в продукте больше полезных веществ.

3. Получение оптимальной формулы стерилизации

Формула стерилизации оптимизирована по критерию минимальных затрат на управление процессом с учетом ограничений. Критерий оптимизации формулы стерилизации имеет следующий вид:

$$J_{\text{о.ф.с.}} = \int_0^t Q(\tau) d\tau + K_1(115 - t_{\text{прод.макс.}}^{\circ})^n + K_2(L_{\text{зад}} - L_{\text{кон}})^m \rightarrow \min, \quad (1)$$

где K_1, K_2 – весовые коэффициенты; $L_{\text{зад}}$ – заданное значение фактического стерилизующего эффекта; $L_{\text{кон}}$ – значение фактического стерилизующего эффекта по окончании процесса; n и m – показатели степени при штрафных величинах; $Q(\tau)$ – энергозатраты на этапах А, В, D (рис. 2):

$$Q(\tau) = Q_A + Q_B + Q_D. \quad (2)$$

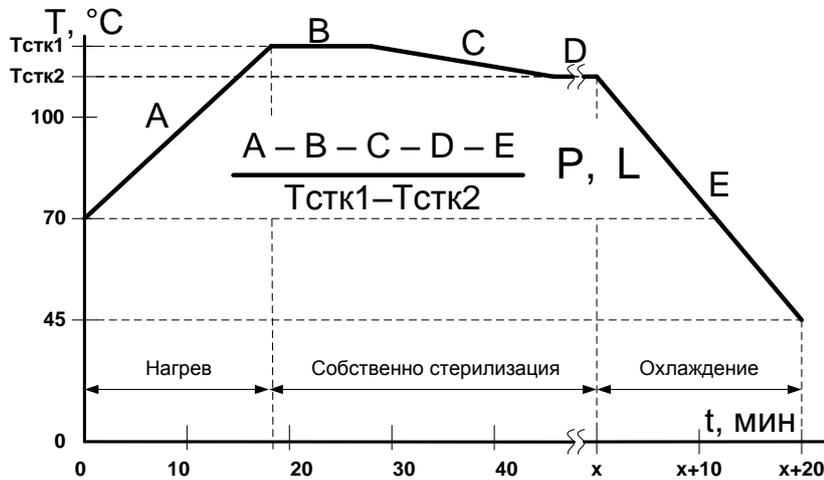


Рис. 2. Модернизированный способ стерилизации. Этапы технологического процесса

Первое слагаемое в выражении (1) включает в себя затраты на управление процессом стерилизации. $Q(\tau)$ включает в себя три составляющие (2) – затраты на управление на этапах Q_A, Q_B и Q_D . Стерилизация на этапе C происходит при естественном охлаждении автоклава.

На этапе А осуществляется прогрев воды в стерилизационной камере до температуры стерилизации $T_{\text{стк1}}$. В зависимости от этой температуры затраты на нагрев воды будут разными, следовательно, этот параметр необходимо оптимизировать. Также на этапе А электроэнергия расходуется на нагрев консервов и компенсацию потерь в окружающую среду:

$$Q_A(\tau) = G_1 c_1 (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}) + F \tau_a \lambda (T_{\text{ст}} - T_{\text{в}}) + G_2 c_2 (T_{\text{к.А}} - T_{\text{н.А}}), \quad (3)$$

где G_1 – масса тела (воды), кг; c_1 – теплоемкость тела (воды), Дж/(кг·К); T_n и T_k – начальная и конечная температуры в процессе нагрева соответственно, К; τ – время рассматриваемого участка, с; F – площадь поверхности аппарата, м²; $T_{ст}$ – температура стенки, К; T_b – температура воздуха в помещении, К; G_2 – масса тела (консервы), кг; c_2 – теплоемкость тела (консервы), Дж/(кг·К); $T_{н,А}$; $T_{к,А}$ – начальная и конечная температуры консервов в процессе нагрева соответственно, К; λ – суммарный коэффициент теплопроводности при температуре стенки, Вт/(м²·К).

На этапах B и D необходимо поддерживать температуру стерилизации $T_{стк1}$ и $T_{стк2}$, то есть компенсировать теплоотдачу автоклава в окружающую среду и обеспечивать нагрев консервов:

$$Q_B(\tau) = F \tau_b \lambda (T_{ст} - T_b) + G_2 c_2 (T_{к,В} - T_{н,В}), \quad (4)$$

$$Q_D(\tau) = F \tau_d \lambda (T_{ст} - T_b). \quad (5)$$

На этапе D энергозатраты на нагрев консервов незначительны и не учитываются в оценке $J_{о.ф.с.}$ (5). Продолжительности этапов B и D являются оптимизируемыми параметрами.

Второе и третье слагаемое в выражении (1) – "штрафные" величины $J_{о.ф.с.}$, отвечающие за выполнение ограничения на модернизированный процесс стерилизации по максимальному значению температуры продукта (115 °С) и требуемому значению фактического стерилизующего эффекта $L_{зад}$ (6,7 усл. мин).

Результаты проведенного исследования по определению показателей степени при штрафных величинах n и m позволили установить, что наилучшим образом интегральная оценка штрафует при выходе за технологические ограничения при n и m , равных 4 (при весовых коэффициентах $K_1 = 100$, $K_2 = 10$).

Оптимизацию проводили методом покоординатного спуска в программе Modern_Optim, разработанной сотрудниками кафедры АиВТ МГТУ. Результаты оптимизации приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты оптимизации формулы стерилизации для консервов "Печень трески натуральная" в банке Impress для автоклава АВК-30М

Оптимизируемый параметр	Значения оптимизируемых параметров
Температура в стерилизационной камере $T_{стк1}$, °С	119,9
Продолжительность этапа τ_b , мин	9,1
Продолжительность этапа τ_d , мин	16,5

Полученная оптимальная формула стерилизации имеет следующий вид:

$$\frac{16,5 - 9 - 23 - 16,5 - 20}{120 - 115} 0,19 - 0,16. \quad (6)$$

4. Оптимизация регуляторов температуры

В системе управления АВК-30М в контурах регулирования температуры реализована рекуррентная форма цифрового ПИД-регулятора параллельной структуры:

$$U(i) = U(i-1) + a_0 e(i) + a_1 e(i-1) + a_2 e(i-2), \quad (7)$$

где $a_0 = K_p + T_d / T_k$, $a_1 = T_k / T_I - K_p - 2T_d / T_k$, $a_2 = T_d / T_k$, $e(i) = Q(i) - Y(i)$; K_p – коэффициент пропорциональной составляющей; T_I – коэффициент интегральной составляющей; T_d – коэффициент дифференциальной составляющей; T_k – шаг квантования; $e(i)$ – рассогласование на i шаге; $e(i-1)$ – рассогласование на $i-1$ шаге; $e(i-2)$ – рассогласование на $i-2$ шаге; $U(i-1)$ – управление на $i-1$ шаге; $U(i)$ – управление на i шаге; i – номер шага квантования; $Q(i)$ – задающее воздействие на i шаге квантования; $Y(i)$ – регулируемый параметр на i шаге квантования.

Д-составляющая использоваться не будет в силу плавного изменения задающего воздействия (согласно режиму стерилизации) и инерционности происходящих в объекте процессов.

Коэффициенты регуляторов температуры парогенератора и стерилизационной камеры автоклава АВК-30М на этапах нагрева и собственно стерилизации оптимизированы по критерию минимальных затрат на управления с помощью программного обеспечения Reg_Sost, разработанного сотрудниками кафедры АиВТ МГТУ (рис. 3). Для оптимальной настройки параметров регуляторов был выбран следующий критерий оптимальности:

$$J_S = \int_0^t (e(t) + k U(t)) dt \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $e(t)$ – рассогласование; k – весовой коэффициент; $U(t)$ – величина управляющего воздействия.

Критерий оптимальности (8) позволяет минимизировать отклонение температуры от заданного значения и затраты на управление. Результаты оптимизации приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты оптимизации параметров регуляторов температуры АВК-30М

Коэффициенты регуляторов	Контур регулирования температуры			
	Стерилизационная камера		Парогенератор	
	Нагрев	С.Стер		
Kp	0,9	11,73	15	15
Ti	500	5,21	10	10

5. Проведение экспериментов

Основной задачей испытаний была экспериментальная оценка эффективности модернизированного способа стерилизации консервов, с точки зрения проведенной оптимизации.

Оценка эффективности производилась сравнением экспериментальных данных, полученных при испытаниях модернизированного и традиционного способов стерилизации. Результаты испытаний получены в ходе процесса стерилизации опытных образцов консервов "Печень трески натуральная" и представлены на рис. 3 и 4.

Результаты испытаний стерилизационной установки АВК-30М показывают, что температура и давление на протяжении процесса соответствуют заданным в формулах стерилизации. Максимальное отклонение ($\Delta T_{стк}$) измеренного датчиком значения температуры стерилизационной камеры от заданного не превышает 5 % на этапах нагрева и охлаждения и 1 % – на этапе собственно стерилизации. Это свидетельствует о том, что работа системы регулирования соответствует требованиям к проведению процесса стерилизации.

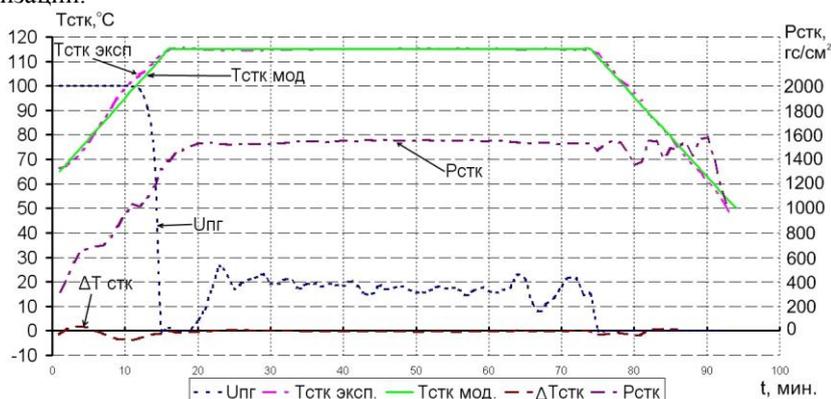


Рис. 3. Температура, давление в стерилизационной камере и управление, поступающее на парогенератор при традиционном способе стерилизации

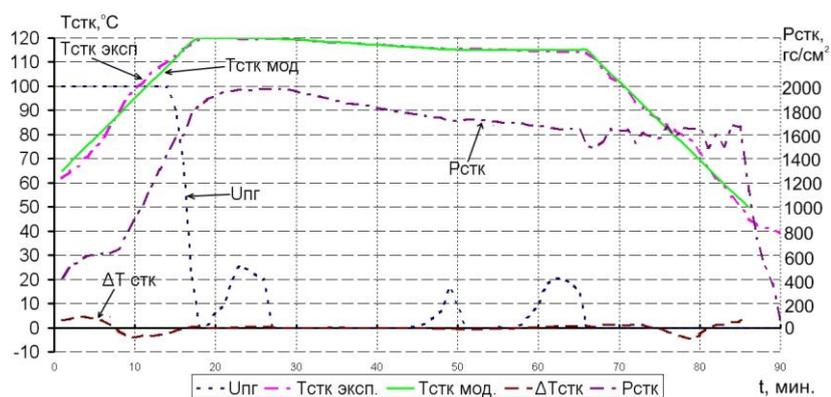


Рис. 4. Температура, давление в стерилизационной камере и управление, поступающее на парогенератор при модернизированном способе стерилизации

Сравнение способов стерилизации показывает, что модернизированный способ является более эффективным с точки зрения энергозатрат и времени процесса (рис. 4).

Потребляемая электроэнергия меньше на 20 %, продолжительность модернизированного способа стерилизации короче на 8,9 %. Это позволяет повысить коэффициент использования стерилизационной установки и уменьшить энергозатраты на выработку партии консервной продукции.

6. Заключение

Таким образом, в ходе проведенного исследования были получены оптимальная формула стерилизации для консервов "Печень трески натуральная" для автоклава АВК-30М, а также оптимальные параметры регуляторов температуры стерилизационной камеры и парогенератора. Установлено, что процесс стерилизации консервов, проведенный по модернизированному способу, позволяет получить экономию электроэнергии до 20 % по сравнению с традиционным и сократить продолжительность работы стерилизационной установки на 9 %.

Литература

- Власов А.В., Кайченев А.В.** Оптимизация процесса стерилизации паром в автоклавах периодического действия. *Мурманск, МГТУ*, 6 с., 2008.
- Кайченев А.В., Власов А.В., Власова А.Р.** Повышение эффективности стерилизационных установок с использованием модернизированного способа стерилизации консервной продукции. *Мат. Всеросс. молодежной конф. "Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2011)". Сборник докладов. М., МГТУ "Станкин"*, с.62-66, 2011а.
- Кайченев А.В., Гроховский В.А., Маслов А.А.** Совершенствование способа стерилизации консервов из гидробионтов. *Рыбное хозяйство*, № 3, с.112-113, 2011б.