

УДК 664.8.036.2

Исследование влияния неоднородности температурного поля при продувке стерилизационной камеры автоклава на различие стерилизующих эффектов в банках

**А.М. Ершов¹, В.А. Гроховский¹, А.А. Маслов², А.В. Власов²,
А.В. Кайчен²**

¹ *Технологический факультет МГТУ, кафедра технологии пищевых производств*

² *Политехнический факультет МГТУ, кафедра автоматики и вычислительной техники*

Аннотация. В статье описываются результаты моделирования процесса стерилизации гомогенных консервов, производится оценка влияния неоднородности температурного поля при продувке стерилизационной камеры автоклава на различие стерилизующих эффектов в банках партии, а также оценивается влияние величины инерционности продукции по нагреву на различие стерилизующих эффектов.

Abstract. The paper describes results of homogeneous can sterilization modeling. The influence of nonuniformity of temperature field and tin inertia on difference of sterilization efficiency in random tins has been evaluated.

1. Введение

Тепловая стерилизация является наиболее распространенным способом сохранения (консервирования) пищевых продуктов. Хотя этот способ появился более двух веков назад (конец 18 – начало 19 вв.), технология процесса постоянно совершенствуется.

В основном изменения направлены на повышение качества итоговой продукции и на увеличение экономической эффективности стерилизационной установки. На стерильность консервов оказывают влияние температура и время стерилизации. При увеличении длительности процесса и при повышении температуры уничтожается больше микроорганизмов, их спор, инактивируется больше тканевых ферментов сырья (*Бабарин, 2006; Флауменбаум, 1982*).

В настоящее время считается, что температурное поле в стерилизационных камерах современных автоклавов однородно (различие температур по объему менее градуса), однако это утверждение справедливо не для каждого момента цикла стерилизации. Известно, что на этапе продувки паровой стерилизации консервов имеющийся в стерилизационной камере воздух (обладающий большим термическим сопротивлением) замещается паром (термическое сопротивление которого во много раз ниже). Следовательно, нельзя утверждать, что все точки объема стерилизационной камеры будут прогреваться с одинаковой скоростью, неизбежно будет присутствовать разброс скоростей нагрева, вызванный тем, что из одной области камеры воздух уже вытеснен, а из другой еще только вытесняется и, соответственно, там присутствует паровоздушная смесь различных концентраций.

В литературе не удалось найти исследований, посвященных упомянутому вопросу, однако его освещение важно для более полного понимания динамики процессов нагревания продукта при стерилизации с целью совершенствования системы управления стерилизационной установкой.

2. Постановка задачи

Требуется оценить влияние неоднородности температурного поля стерилизационной камеры автоклава на этапе продувки на разброс стерилизующих эффектов получаемой партии консервов. Для этого необходимо знать временные зависимости температуры греющей среды в различных точках стерилизационной камеры и значения стерилизующего эффекта различных банок партии.

Существует официально принятая методика измерения температурного поля греющей среды (*Методика изучения...*, 1983), однако согласно ей температура греющей среды фиксируется лишь в одной точке. При этом датчики температуры, предназначенные для определения стерилизующего эффекта в наименее прогреваемой точке консервов, вводятся в центр заполненных фаршем банок.

Хотя фаршевые консервы представляют собой однородную массу, скорости нагрева и начальные температуры двух банок одной партии неизбежно будут различаться, а потому с целью уменьшения влияния сторонних факторов на результаты исследования предлагается определить динамику нагрева конкретной консервной банки по известным данным (например, взятым из Методики), а затем провести

моделирование процесса стерилизации. Также необходимо экспериментально определить разброс скоростей нагрева различных точек внутри стерилизационной камеры на этапе продувки.

На основании имеющихся данных при помощи компьютерного моделирования можно решить поставленную задачу, сведя к минимуму влияние собственных параметров отобранных для эксперимента банок.

3. Проведение экспериментов

Для получения временных зависимостей температуры греющей среды использовался разработанный на кафедре АиВТ МГТУ программно-аппаратный комплекс для исследования температурного поля греющей среды стерилизационной камеры, состоящий из регистратора, датчиков температуры и компьютерного программного обеспечения (Власов и др., 2008; Власов и др., 2007а).

При проведении экспериментов в стерилизационную камеру двухсеточного автоклава загружались клетки с балластными банками, заполненными водой. В клетях также размещались пятнадцать датчиков температуры согласно плану эксперимента так, чтобы измерять температуру среды в соответствующих точках заполненного банками объема (рис. 1). Затем выполнялись этапы продувки и нагрева, при этом регистрировались значения температуры в различных точках объема стерилизационной камеры. Пример получаемых временных зависимостей температуры греющей среды приведен на рис. 2.

Использование теории планирования эксперимента при определении мест расположения датчиков температуры вызвано тем, что экспериментальные данные могут быть использованы для получения математической модели температурного поля стерилизационной камеры (Власов и др., 2007б). Для определения координат мест размещения датчиков использовался план Бокса-Бенкина. С целью автоматизации обработки экспериментальных данных была разработана программа, позволяющая рассчитывать коэффициенты и проводить регрессионный анализ трехфакторных полиномиальных моделей по этому плану (Власов, Солодов, 2006).

Рис. 1. Эскиз размещения датчиков в стерилизационной камере и план эксперимента

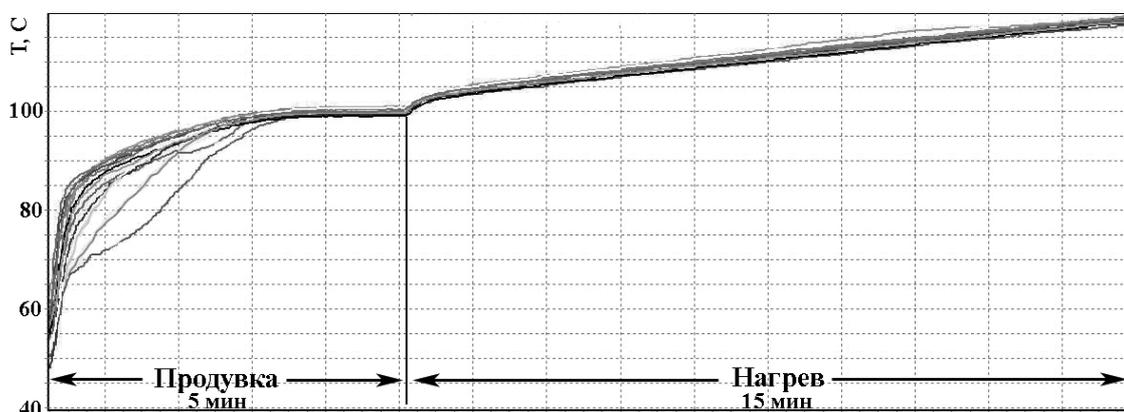
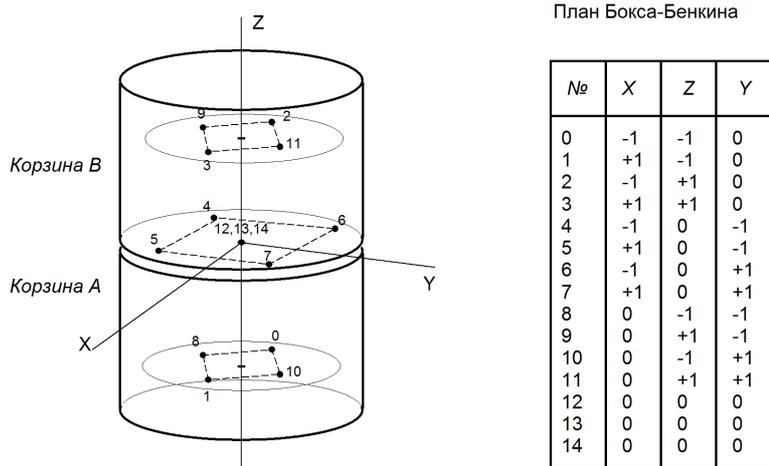


Рис. 2. Пример временных зависимостей температуры в различных точках стерилизационной камеры на этапах продувки и нагрева

4. Моделирование

Моделирование производится для заполненных фаршем консервных банок. Как известно, фаршевые и им подобные гомогенные консервы прогреваются в основном за счет теплопроводности (Бабарин, 2006; Флауменбаум, 1982). Этот процесс достаточно хорошо изучен, поэтому, в отличие от гетерогенной консервной продукции, можно получить математическую модель заполненной фаршем банки по нагреву.

Процесс передачи тепла внутрь банки с фаршем описывается в терминах "вход-выход", причем "входом" для консервной банки будет являться температура греющей среды в непосредственной близости от нее, а "выходом" – температура в наименее прогреваемой точке продукта:

$$W_0(p) = \frac{1}{(T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \lambda \cdot T \cdot p + 1)} \cdot e^{-\tau \cdot p}, \quad (1)$$

где $W_0(p)$ – передаточная функция банки, описываемая инерционным звеном второго порядка и звеном задержки; T – постоянная времени инерционного звена второго порядка, с; λ – коэффициент демпфирования; τ – постоянная времени запаздывания звена задержки, с; p – оператор преобразования Лапласа; t – время, с.

На основании приведенных в Методике численных данных для автоклава АВ-2 и заполненной фаршем банки №3 графоаналитическим методом был получен следующий вид передаточной функции банки:

$$W_0(p) = \frac{1}{(62500 \cdot p^2 + 1000 \cdot p + 1)} \cdot e^{-450 \cdot p}. \quad (2)$$

Определение величины стерилизующего эффекта проводилось по следующей формуле (Бабарин, 2006):

$$L_T^Z = \int_0^{t_{мер}} \frac{dt}{10^{\frac{T-T_0}{Z}}}, \quad (3)$$

где L_T^Z – фактический стерилизующий эффект, усл. мин; T – эталонная температура, °C (121,1 °C); T_0 – временная зависимость температуры в наименее прогреваемой точке банки; Z – константа термоустойчивости микроорганизмов, °C; $t_{мер}$ – время процесса, сек.

По имеющимся данным в среде Simulink пакета MatLab было проведено моделирование стерилизации двух консервных банок, расположенных в наиболее и наименее интенсивно "продуваемых" точках объема стерилизационной камеры. Моделирование проводилось для этапов продувки, нагрева и собственно стерилизации, чтобы исключить влияние способа охлаждения консервов на результат.

Схема моделирования представлена на рис. 3. Блоки "Expulsion", "Heating", "Min", "Max", "Integrator 1" и "Integrator 2" предназначены для синтеза входного воздействия, то есть временной зависимости температуры греющей среды непосредственно в районе банок (по формуле стерилизации (5-10-45-20)/120). Блоки "Delay 1" и "Can 1", "Delay 2" и "Can 2" воспроизводят передаточные функции банок согласно формуле (2). Блоки "К 1" и "К 2" служат для получения текущего значения переводных коэффициентов (Бабарин, 2006; Флауменбаум, 1982), после чего осуществляется интегрирование блоками "iL 1" и "iL 2", позволяя получить значение стерилизующих эффектов "L 1" и "L 2". Схема также демонстрирует абсолютное (в условных минутах) и относительное значения разницы стерилизующих эффектов (блоки "L difference umin" и "L difference rel" соответственно).

Временные зависимости температуры греющей среды в двух точках (Steam 1 и Steam 2), а также температур в центрах банок (Can 1 и Can 2) приведены на рис. 4. По данным моделирования, различия в стерилизующем эффекте на момент окончания этапа собственно стерилизации при данных параметрах составили 0,13 условных минуты (или 5,5 % от накопленного к данному моменту значению).

Оценим влияние коэффициента демпфирования λ и инерционности (постоянной времени T) продукта по нагреву на различие итоговых стерилизующих эффектов. Для этого будем проводить моделирование процесса стерилизации, изменяя параметры λ и T формулы (1), при этом будем соответствующим образом изменять продолжительность этапа собственно стерилизации так, чтобы в результате достигались одни и те же значения стерилизующих эффектов для одной из банок. На рис. 5 изображена зависимость относительной разницы стерилизующих эффектов от значения постоянной времени продукта.

Каждая из приведенных кривых имеет выраженный максимум, в котором имеющаяся неоднородность температурного поля оказывает максимальное влияние на разброс стерилизующих эффектов. При значениях постоянной времени больше точки максимума форма кривых подтверждает предположение, что с увеличением постоянной времени разница между стерилизующими эффектами

должна уменьшаться, так как более инерционные объекты склонны меньше реагировать на относительно быстро изменяющиеся сигналы на входе.

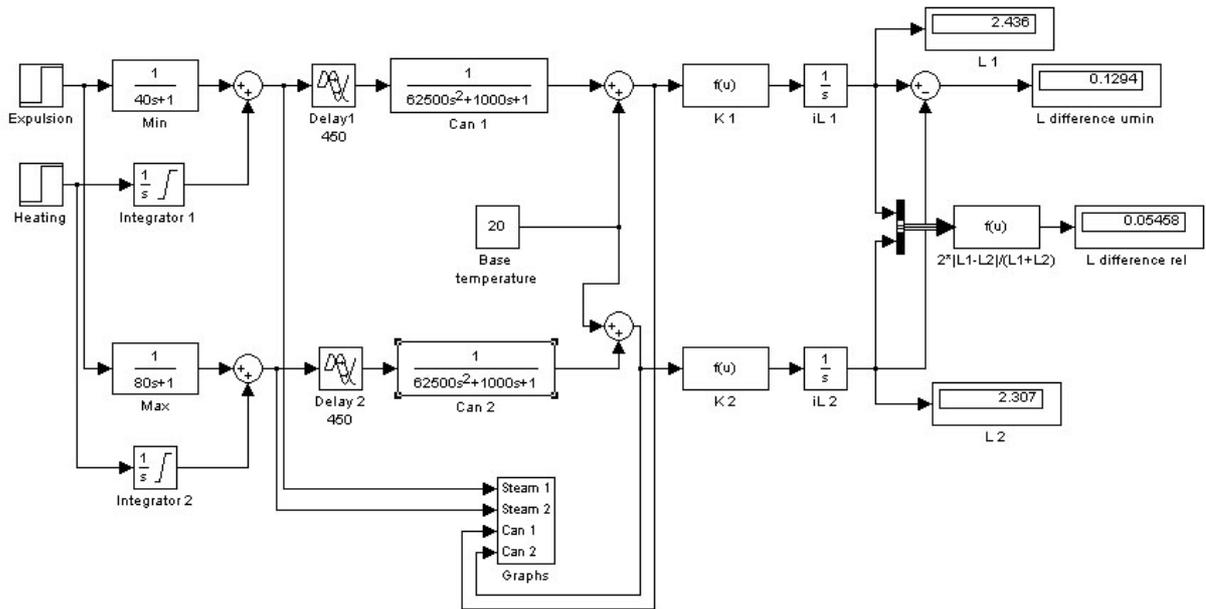


Рис. 3. Схема моделирования процесса стерилизации консервов в среде Simulink

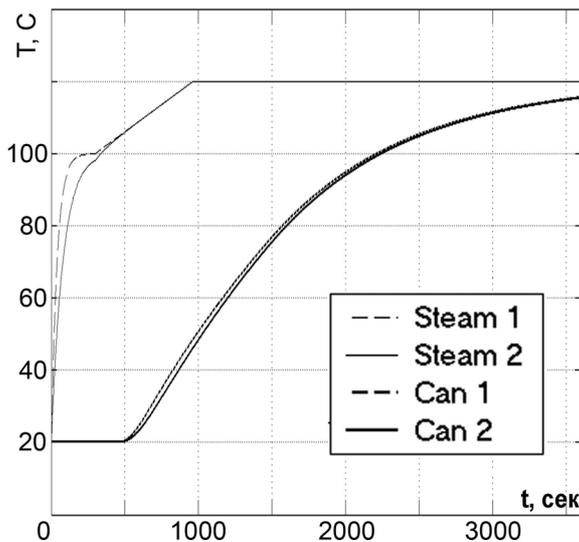


Рис. 4. Временные зависимости температуры греющей среды в двух точках стерилизационной камеры, а также температур в наименее прогреваемых точках банок для $T = 250$ с и $\lambda = 2$

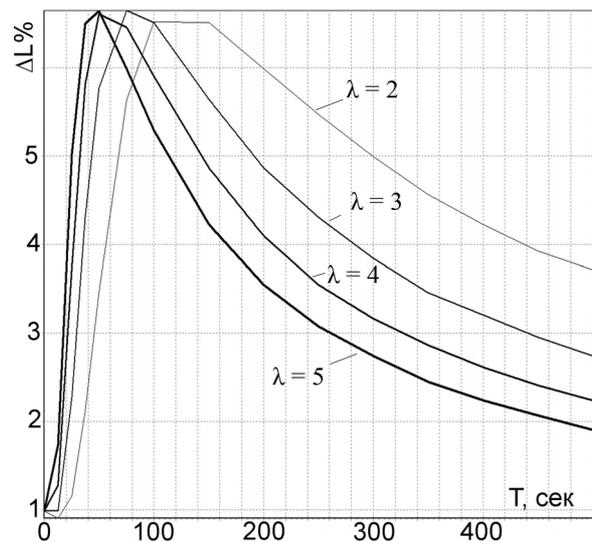


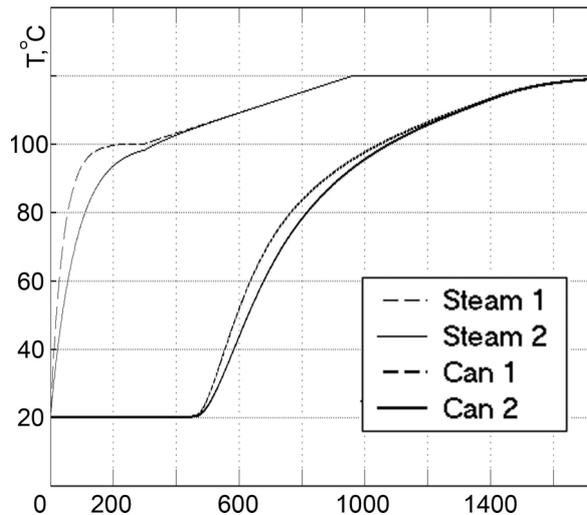
Рис. 5. Зависимость относительной разницы стерилизующих эффектов ΔL от значений постоянной времени продукта T и коэффициента демпфирования λ

В диапазоне от 0 до точки максимума наблюдается уменьшение влияния неоднородности поля с уменьшением инерционности объекта, что противоречит приведенному выше предположению. Чтобы объяснить это несоответствие, приведем на рис. 6 временные зависимости температуры греющей среды в двух точках (Steam 1 и Steam 2), а также температур в центрах банок (Can 1 и Can 2) для значения постоянной времени, например, 50 секунд и коэффициента демпфирования 2.

В отличие от процесса при $T = 250$ секунд, приведенные на рис. 6 временные зависимости имеют одно отличие, а именно то, что до истечения времени этапа собственно стерилизации температуры в центрах банок достигают температуры греющей среды, то есть устанавливается статическое равновесие. Так как скорость инактивации микроорганизмов нелинейно зависит от температуры, при значении температуры в центре банки 120 °C стерилизующий эффект нарастает

наиболее быстро и, что еще важнее, одинаково у обеих банок, при этом вносимая неоднородностью температурного поля разница в стерилизующих эффектах уменьшается.

Рис. 6. Временные зависимости температуры греющей среды в двух точках стерилизационной камеры, а также температур в наименее прогреваемых точках банок для $T = 50$ с и $\lambda = 2$



Изменение постоянной времени запаздывания звена задержки (1) не оказывает действия на разницу в стерилизующем эффекте, так как запаздывание напрямую влияет на продолжительность этапа собственно стерилизации. Например, при увеличении запаздывания на 60 секунд, для достижения того же стерилизующего эффекта необходимо будет увеличить продолжительность этапа собственно стерилизации также на 60 секунд.

5. Выводы

Было проведено моделирование процесса стерилизации фаршевых консервов. Главным результатом исследования является подтверждение гипотезы о значимом влиянии неоднородности температурного поля при продувке стерилизационной камеры на различие стерилизующих эффектов в банках. Оценено влияние инерционности (постоянной времени и коэффициента демпфирования) продукта на различие стерилизующих эффектов.

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что неоднородность температурного поля в стерилизационной камере аппарата при продувке оказывает меньшее влияние на консервы малых размеров и обладающие малым термическим сопротивлением, а также сравнительно больших размеров и обладающих большим термическим сопротивлением. Различные стерилизационные установки по-разному эффективны в процессе стерилизации различных видов консервной продукции.

Вышесказанное справедливо для заполненных однородной пищевой продукцией консервов, прогреваемых в основном за счет теплопроводности (пюре, фарши), однако выводы должны распространяться и на прогреваемые за счет конвективного теплообмена виды консервов.

Используемая в исследовании методика позволяет упростить процесс изучения температурного поля греющей среды аппаратов периодического действия за счет размещения датчиков температуры в греющей среде с последующей обработкой полученных данных для нахождения наименее прогреваемой точки стерилизационной камеры.

Результаты исследования будут использованы при синтезе оптимальной системы автоматического управления процессом стерилизации.

Литература

- Бабарин В.П.** Стерилизация консервов: Справочник. СПб., ГИОРД, с.20-23, 81-90, 2006.
- Власов А.В., Кайченев А.В., Маслов А.А.** Программно-аппаратный комплекс для экспериментального исследования температурного поля в стерилизационной камере автоклава. *Сб. трудов VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Молодежь и современные информационные технологии". Томск, с.393-395, 2008.*
- Власов А.В., Кайченев А.В., Маслов А.А.** Практическая реализация программного-аппаратного комплекса для экспериментального исследования температурного поля в стерилизационной камере автоклава. *Сб. статей XI Международной научно-практической конференции "Современные технологии в машиностроении". Пенза, с.267-269, 2007.*

- Власов А.В., Кайченев А.В., Маслов А.А.** Исследование температурного поля в стерилизационной камере автоклава с использованием теории планирования активного эксперимента. *Материалы III международной научно-технической конференции "Автоматизация и энергосбережение машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования"*. Вологда, ВоГТУ, т.1, с.193-196, 2007.
- Власов А.В., Солодов В.С.** Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения № 2006613875 "Расчет коэффициентов и регрессионный анализ трехфакторной полиномиальной модели", 2006.
- Методика изучения температурного поля греющей среды аппаратов периодического действия для стерилизации консервов. М., *Министерство рыбного хозяйства СССР*, с.2-5, 9, 1983.
- Флауменбаум Б.Л.** Основы консервирования пищевых продуктов. М., *Легкая и пищевая пром-сть*, с.47-48, 135-137, 167-170, 178-186, 1982.