

УДК 664.8.036.2

Способ оптимального управления температурой в автоклаве на основе регулятора "с предсказанием"

А.А. Маслов, А.В. Власов, А.В. Кайченев, А.Р. Власова, В.В. Яценко

Политехнический факультет МГТУ, кафедра автоматике

и вычислительной техники

Аннотация. В статье описывается способ оптимизации контура управления температурой в стерилизационной камере автоклава. Приводятся результаты численного моделирования процесса стерилизации консервной продукции с традиционным регулятором и с регулятором "с предсказанием".

Abstract. The paper describes the method of optimization of the autoclave sterilization chamber's temperature control circuit. The results of computer modeling for canned food sterilization using traditional regulator and "predicting" regulator have been offered.

Ключевые слова: автоматика, стерилизация, автоклав, замкнутый цикл

Key words: automatics, sterilization, autoclave, closed loop

1. Введение

Консервное производство является отраслью, затрагивающей вопросы продовольственной безопасности и самообеспечения страны продуктами питания. Необходимость его совершенствования и повышения эффективности является очевидной. В настоящее время одним из инструментов развития производственной сферы считается малый бизнес, мобильный и хорошо приспособляющийся к рыночной обстановке. Тем не менее, в консервной отрасли он не играет существенной роли, так как данное производство требует сравнительно больших капиталовложений, а современные стерилизационные установки имеют достаточно высокую стоимость. Малые предприятия используют, в основном, автоклавы предыдущих поколений, имеющие большие затраты ресурсов на выпуск продукции.

Для оснащения предприятий малого бизнеса требуются недорогие и экономичные автоклавы, поэтому разработка способов повышения эффективности стерилизационных установок с целью снижения затрат на производство консервной продукции является актуальной и практически полезной задачей. Ее решение напрямую связано с сокращением затрат энергии на процесс стерилизации.

В статье приводятся результаты исследования влияния типа регулятора температуры в стерилизационной камере автоклава на расход теплоносителя в ходе процесса стерилизации. Предлагается способ уменьшения затрат теплоносителя, основанный на использовании оптимально настроенного ПИ-регулятора "с предсказанием".

2. Описание объекта

Объектом исследования является контур управления температурой в автоклаве, предназначенном для стерилизации консервной продукции. Традиционно для решения задачи управления температурой в стерилизационной камере автоклавов используется дискретный ПИ-регулятор в рекуррентной форме:

$$\begin{aligned} e[k] &= Q[k] - Y[k], \\ U[k] &= U[k-1] + K_p \cdot (e[k] - e[k-1]) + K_i \cdot e[k-1], \end{aligned} \quad (1)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ – номер шага квантования; $e[k]$ и $e[k-1]$ – ошибка управления на текущем и предыдущем шагах квантования; $Q[k]$ – заданное значение регулируемой величины (температуры в стерилизационной камере) на текущем шаге квантования; $Y[k]$ – сигнал обратной связи (температура в стерилизационной камере) на текущем шаге квантования; K_i – коэффициент И-составляющей регулятора; K_p – коэффициент П-составляющей регулятора; $U[k]$ и $U[k-1]$ – значение управления на текущем и предыдущем шагах квантования соответственно.

Д-составляющая не используется в силу плавного изменения задающего воздействия (согласно режиму стерилизации) и большой инерционности основного возмущающего воздействия, т.е. отбора теплоты продуктом. Использование более сложных алгоритмов управления для решения задачи управления температурой в автоклаве не оправдывает себя с точки зрения затрат ресурсов управляющей вычислительной машины.

Для ускорения и удешевления процесса оптимальной настройки регулятора на заданные критерии качества управления температурой в аппарате требуется наличие математической модели объекта. В работе (Власов, 2010) по экспериментальным данным было произведено построение моделей процесса теплообмена в автоклаве АВК-30 (лаборатория СТППГ кафедры ТПП МГТУ) для этапов продувки, нагрева и собственно стерилизации.

На этапе продувки стерилизационная камера не является герметично изолированной от окружающей среды, в отличие от этапов нагрева и собственно стерилизации. Таким образом, в ходе процесса стерилизации регулятор температуры в стерилизационной камере на разных этапах управляет объектом с существенно изменяющимися параметрами. Поэтому модель теплообмена в аппарате для этапа продувки существенно отличается от моделей для этапов нагрева и собственно стерилизации.

В ходе процесса стерилизации консервной продукции в паровой среде работа системы управления принципиально различается для каждого этапа. На этапе продувки осуществляется вытеснение паром воздуха из стерилизационной камеры и прогрев ее до 100 °С. На этапе нагрева осуществляется повышение температуры в аппарате до заданной по режиму. Это значение температуры поддерживается в течение всего этапа собственно стерилизации. На этапе охлаждения температура в аппарате снижается до 45 °С. На этом этапе контур управления температурой не функционирует, так как не требуется подача теплоносителя в аппарат.

3. Постановка задачи

Использование традиционного ПИ-регулятора в процессе управления температурой в автоклаве приводит к неоправданному расходованию ресурсов, вызванному перегревами (перерегулированиями). Они возникают в силу различных причин. Например, вследствие изменения параметров объекта при герметизации стерилизационной камеры аппарата в момент перехода от этапа продувки к этапу нагрева. Управляющее воздействие, обеспечивающее достижение заданной температуры 100 °С к моменту окончания этапа продувки, в начале этапа нагрева приводит к превышению заданного значения температуры, так как пар из стерилизационной камеры уже не удаляется. Причиной еще одного стабильно возникающего перегрева (рис. 1) является совокупное влияние собственной инерционности объекта управления и изменения задающего воздействия при переходе от этапа нагрева к этапу собственно стерилизации.

Кроме того, применение одних и тех же коэффициентов регулятора не позволяет обеспечить оптимального протекания процесса стерилизации на всех его этапах, так как различаются предъявляемые к системе управления требования, а также структура объекта. Обычно в подобных случаях, требующих изменения коэффициентов регулятора в процессе работы объекта, используется безударное переключение (Михайлова, 2003). Оно позволяет обеспечить отсутствие в момент переключения скачков управляющего воздействия, вызванных обнулением И-составляющей.

Был проведен ряд численных экспериментов с использованием полученной математической модели автоклава АВК-30. По их результатам (рис. 2) было установлено, что в случае с процессом стерилизации безударное переключение не позволяет обеспечить наилучших с точки зрения экономии теплоносителя условий работы регулятора в момент переключения.

Основной целью настоящего исследования является разработка способа, позволяющего уменьшить расход теплоносителя на процесс стерилизации консервной продукции за счет реализации управления, не допускающего перегревы в ходе процесса стерилизации при сохранении возможности индивидуальной настройки коэффициентов регулятора температуры в аппарате для каждого этапа.

4. Алгоритм переключения "с предсказанием"

В качестве способа, позволяющего не допустить перегревов в ходе процесса стерилизации и, таким образом, обеспечить экономию теплоносителя, авторы предлагают алгоритм переключения "с предсказанием". Для расчета управляющего воздействия на первом шаге нового этапа предлагается использовать долю K_x от управляющего воздействия на последнем шаге предыдущего этапа. Так как накопленное к моменту окончания предыдущего этапа управляющее воздействие уже компенсирует изменение собственных характеристик объекта и окружающей среды, то на следующем этапе эта

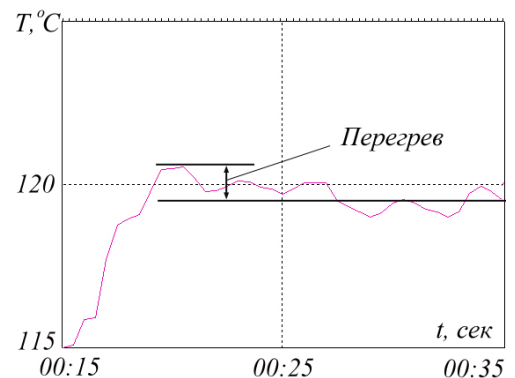


Рис. 1. Временная зависимость температуры в автоклаве на этапах продувки и собственно стерилизации при использовании типового ПИ-регулятора

информация учитывается в управляющем воздействии, начиная с первого шага. Получаемый процесс управления "предсказывает" необходимое для реализации наилучшего управляющего воздействия значение И-составляющей на первом шаге управления с новыми коэффициентами (рис. 3). Таким образом, для первого шага нового этапа управляющее воздействие вычисляется по формуле:

$$U[k] = K_x \cdot U[k-1] + K_p \cdot \varepsilon[k]. \quad (2)$$

K_x предлагается определять вместе с коэффициентами П- и И-составляющих регулятора при оптимизации системы управления итерационными методами. Таким образом, в ходе поиска оптимальных коэффициентов регулятора необходимо определить три тройки оптимальных коэффициентов (по одной для каждого этапа процесса стерилизации): K_p , K_i и K_x .

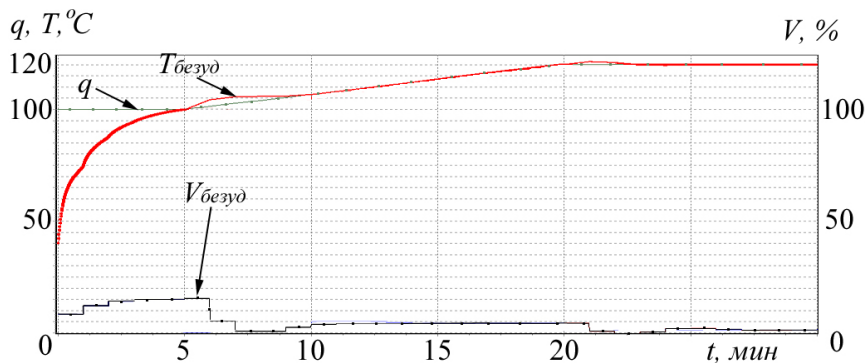


Рис. 2. Пример безударного переключения в процессе стерилизации: q – заданное значение температуры; $T_{безд}$ – временная зависимость температуры в стерилизационной камере; $V_{безд}$ – временная зависимость управляющего сигнала

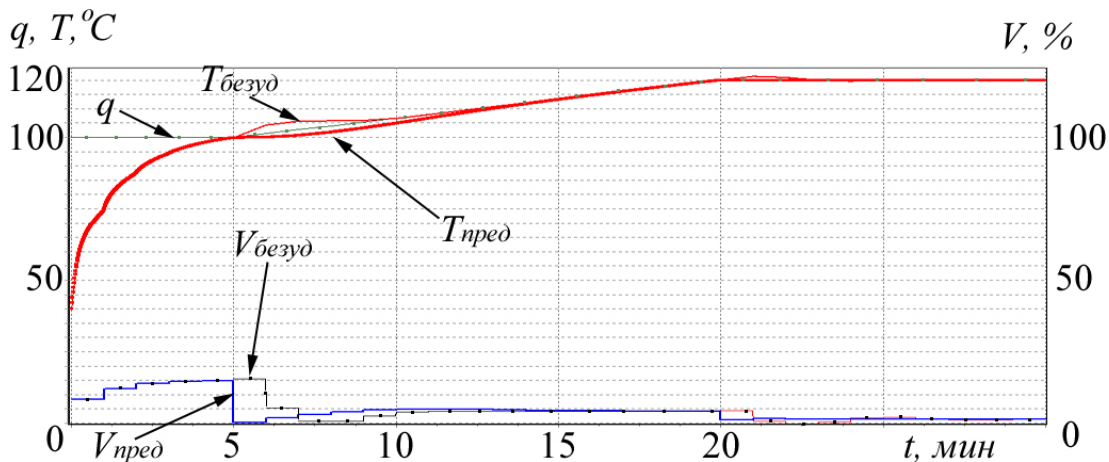


Рис. 3. Пример переключения "с предсказанием" в процессе стерилизации: q – заданное значение температуры; $T_{безд}$ и $V_{безд}$ – временные зависимости температуры и управляющего сигнала в стерилизационной камере при безударном переключении; $T_{пред}$ и $V_{пред}$ – временная зависимость температуры и управляющего сигнала в стерилизационной камере при переключении "с предсказанием"

5. Проведение экспериментов

Эксперименты проводились на стерилизационной установке АВК-30. В ходе экспериментов фиксировались показания девяти датчиков температуры, расположенных равномерно в сечении верхней корзины стерилизационной камеры; датчика температуры, расположенного в центре банки, размещенной в середине верхней корзины; датчиков давления в парогенераторе и стерилизационной камере. Функции преобразования сигналов с датчиков и ведения архивов были возложены на систему управления стерилизационной установкой, построенной на базе оборудования для общепромышленной автоматизации отечественной фирмы "ОВЕН". Обработка результатов экспериментов производилась с использованием разработанного авторами программного обеспечения "МИСт.Идентификация".

В ходе экспериментов был предварительно произведен процесс стерилизации с выбранным видом консервной продукции – имитатором супа рыбного кубанского. По результатам этого эксперимента при помощи итерационных методов идентификации были рассчитаны параметры математической модели АВК-30 при стерилизации данного вида продукта.

Наличие математической модели аппарата позволило существенно ускорить и удешевить процесс поиска оптимальных коэффициентов регулятора температуры в автоклаве. Для настройки регулятора требовалось сформулировать критерии оптимальности. Так как требования, предъявляемые к контуру управления температурой в аппарате, различаются для всех этапов процесса стерилизации, для каждого из них были сформулированы свои критерии оптимальности в виде интегральных оценок (Власов и др., 2010).

На этапе продувки выбранный критерий обеспечивает достижение температуры 100 °С к моменту окончания этапа при уменьшении расходуемого в течение этапа количества теплоносителя. На этапе нагрева выбранный критерий оптимальности обеспечивает достижение заданной температуры стерилизации к моменту окончания этапа, а также экономию теплоносителя. Наибольшее влияние на стерильность вырабатываемых консервов оказывает этап собственно стерилизации. Даже небольшие отклонения (свыше 1 °С) могут привести к выработке некондиционной партии продукта. Поэтому на данном этапе при оптимизации ставилась единственная задача – минимизация отклонений от заданного значения температуры в стерилизационной камере.

По выбранным критериям при помощи итерационных методов оптимизации был произведен расчет оптимальных коэффициентов регуляторов с безударным переключением и "с предсказанием". Расчет производился в разработанном авторами программном продукте "МИСт.Оптимизация". Расчетное значение параметра K_i для этапа нагрева равно 0, для этапа собственно стерилизации 0,3.

Были проведены несколько экспериментов с регуляторами с безударным переключением и "с предсказанием". На рис. 4 и 5 приведены полученные временные зависимости заданного значения температуры в аппарате q , действующего значения температуры в стерилизационной камере $T_{стк}$, температуры в центре банки, расположенной в наименее прогреваемой области $T_б$, стерилизующего эффекта L , давления в парогенераторе $P_{пг}$ и управляющего сигнала V .

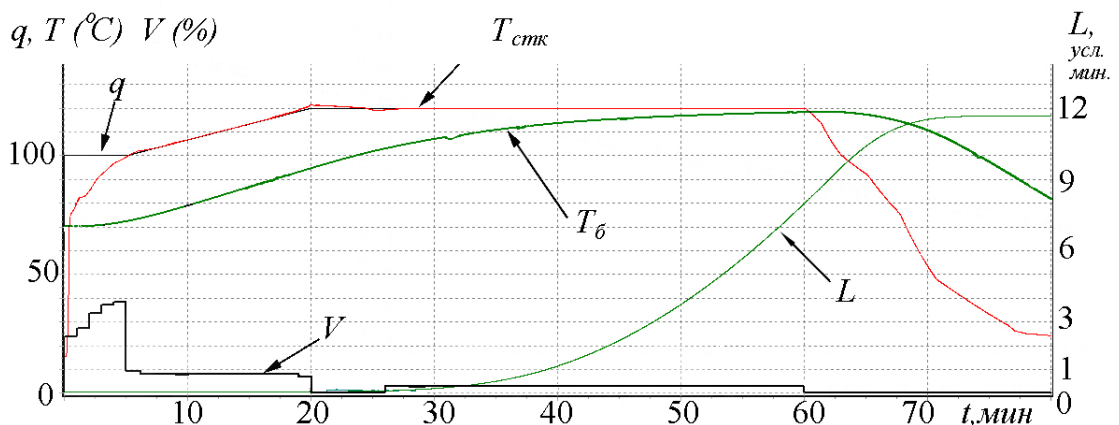


Рис. 4. Временные зависимости процесса стерилизации имитатора супа рыбного кубанского при использовании регулятора с безударным переключением

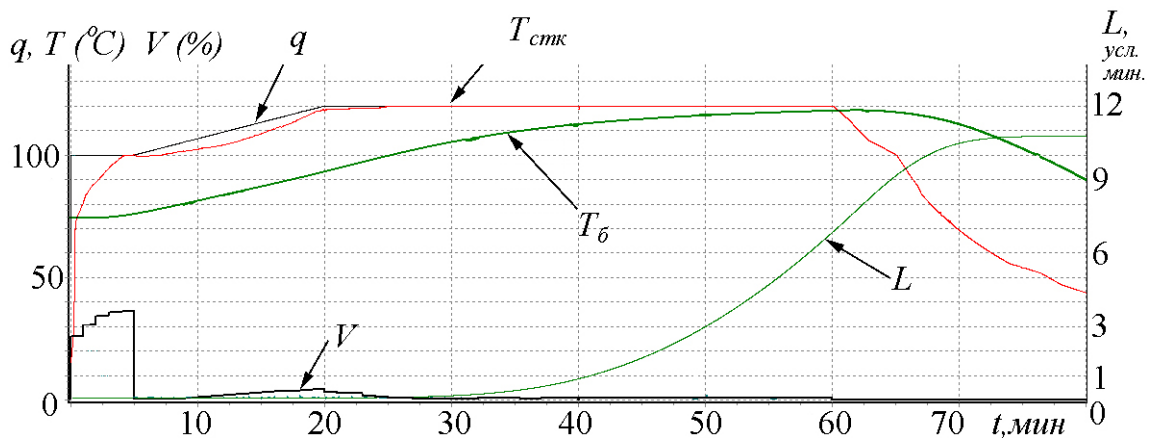


Рис. 5. Временные зависимости процесса стерилизации имитатора супа рыбного кубанского при использовании регулятора "с предсказанием"

Проведенные эксперименты позволили установить, что регулятор "с предсказанием" позволяет полностью исключить перегревы при переходе от этапа к этапу в процессе стерилизации консервов. При этом достигается экономия теплоносителя (в среднем, до 20 %) по сравнению с безударным переключением за счет уменьшения подачи пара в аппарат пропорционально K_x в начале этапа. Заметное на этапе нагрева отставание температуры от заданной при использовании регулятора "с предсказанием" мало сказывается на величине стерилизующего эффекта L . Причиной тому является то, что наибольший вклад в стерильность продукта вносят этапы собственно стерилизации и охлаждения. Таким образом, использование регулятора "с предсказанием" позволяет уменьшить расход теплоносителя в процессе стерилизации консервов при сохранении их высокого качества.

6. Выводы

В работе был предложен алгоритм расчета управляющего воздействия "с предсказанием" в начале этапа процесса стерилизации для контура управления температурой в автоклаве. Были проведены численное моделирование и натурные эксперименты, показавшие, что за счет использования алгоритма "с предсказанием" достигнута экономия теплоносителя до 20 % по сравнению с традиционно используемым безударным переключением при строгом выполнении требований режима стерилизации.

Литература

- Власов А.В.** Повышение эффективности стерилизации консервов паром в автоклавах. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мурманск, МГТУ, 20 с., 2010.*
- Власов А.В., Кайченев А.В., Маслов А.А.** Критерии оптимизации управления температурой в автоклаве при стерилизации паром. *Молодежь и современные информационные технологии. Сб. тр. VIII Всерос. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых. Томск, ТПУ, с.56-57, 2010.*
- Михайлова О.В.** Системы управления объектами с изменяемой структурой: на примере углеобогатительных и металлургических производств. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новокузнецк, 20 с., 2003.*