

Введение алгоритма диагностики аварийных ситуаций в систему автоматизированного управления процессом стерилизации консервов

¹ Российский биотехнологический университет, г. Москва, Российская Федерация

² Вятский государственный университет, г. Киров, Российская Федерация

С. А. Мокрушин¹, И. Г. Благовещенский¹, М. М. Благовещенская¹,
С. И. Охупкин², В. Г. Благовещенский¹

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Мокрушин Сергей Александрович
E-mail: mokrushin@mgupp.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мокрушин, С.А., Благовещенский, И.Г., Благовещенская, М.М., Охупкин, С.И., & Благовещенский, В.Г. (2024). Введение алгоритма диагностики аварийных ситуаций в систему автоматизированного управления процессом стерилизации консервов. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 32(1) 6 108-119. <https://doi.org/10.36107/spfr.2024.1.415>

ПОСТУПИЛА: 02.10.2023

ПРИНЯТА: 15.03.2024

ОПУБЛИКОВАНА: 30.03.2024

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10162, <https://rscf.ru/project/23-79-10162/>.



АННОТАЦИЯ

Введение: Несмотря на многочисленность, разнообразие и оригинальность принятых решений при реализации систем автоматизированного управления процессом тепловой обработки консервов в стерилизаторах периодического действия, в них отсутствует проработанная система диагностики и предотвращения аварийных ситуаций, отвечающая всем требованиям производственного процесса, что делает задачу ее создания актуальной.

Цель: Создать алгоритм управления, наибольшим образом удовлетворяющий всем техническим критериям, предъявляемым к системе автоматизации процесса стерилизации консервов в промышленном автоклаве и имеющий все необходимые защиты и блокировки для безаварийной работы системы управления.

Материалы и методы: За основу повышения надежности и безаварийности работы системы автоматизированного управления были выбраны инструменты технического диагностирования в процессе эксплуатации за счёт введения методов тестового диагностирования в начале производственного цикла и методов функционального диагностирования во время непосредственной работы системы управления. Применение технического диагностирования в процессе эксплуатации выполнено путем доработки общего алгоритма управления и интеграции в него подпрограмм диагностики и предупреждения аварийных ситуаций. Для повышения общей надежности системы применяется подход связанный с внесением изменений в структуру системы управления, опирающийся на расчёт вероятности безотказной работы всех элементов системы по каждому каналу регулирования в отдельности.

Результаты: Предложенный алгоритм работы и разработанная структура системы управления, обеспечивают точный и безаварийный режим работы установки. Учёт в алгоритме работы возможностей возникновения аварийных ситуаций обеспечивает снижение доли брака готовой продукции, что подтверждено производственными испытаниями.

Выводы: Предлагаемый подход диагностики аварийных ситуаций может эффективно использоваться при проектировании систем управления аппаратов, реализующих аналогичные технологии обработки продукта, а также в компьютерных тренажерных комплексах для обучения персонала пищевых производств диагностике и устранению аварийных ситуаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

процесс стерилизации консервов; система автоматизированного управления; алгоритм диагностики аварийных ситуаций; отклонение параметров; обрыв датчика; нарушение герметичности; надежность системы управления

Introduction of algorithm for diagnostics of emergency situations in the system of automated control of the canned sterilization process

¹ Russian Biotechnological University, Moscow, Russian Federation

² Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

Sergey A. Mokrushin¹, Ivan G. Blagoveshchenskiy¹, Margarita M. Blagoveshchenskaya¹, Sergey I. Okhapkin², Vladislav G. Blagoveshchenskiy¹

CORRESPONDENCE:

Mokrushin Sergey Aleksandrovich
E-mail: mokrushin@mgupp.ru

DATA AVAILABILITY:

Data from the current study are available upon request from the corresponding author.

FOR CITATIONS:

Mokrushin, S.A., Blagoveshchenskiy, I.G., Blagoveshchenskaya, M.M., Okhapkin, S.I., & Blagoveshchenskiy V.G. (2024). Introduction of algorithm for diagnostics of emergency situations in the system of automated control of the canned sterilization process. *Storage and Processing of Farm Products*, 32(1). <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.1.415>

RECEIVED: 02.10.2023

ACCEPTED: 15.03.2024

PUBLISHED: 30.03.2024

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 23-79-10162, <https://rscf.ru/project/23-79-10162/>.

ABSTRACT

Introduction: Despite the multiplicity, variety and originality of the decisions taken in the implementation of automatic control systems for the heat treatment of canned food in periodic sterilizers, they lack a well-developed system for diagnosing and preventing emergencies that meets all the requirements of the production process, which makes the task of creating it relevant.

Purpose: To propose a control algorithm that best meets all the technical criteria for the automation system of the sterilization process of canned food in an industrial autoclave and has all the necessary protections and locks for trouble-free operation of the control system.

Materials and Methods: As a basis for improving the reliability and trouble-free operation of the automated control system, well-proven technical diagnostic tools were selected in practice during operation due to the introduction of test diagnostic methods at the beginning of the production cycle and functional diagnostic methods during the direct operation of the control system. The application of technical diagnostics during operation was carried out by refining the general control algorithm and integrating diagnostic and emergency prevention routines into it. To improve the overall reliability of the system, an approach is used related to making changes to the structure of the control system, based on calculating the probability of failure-free operation of all elements of the system for each control channel separately.

Results: The proposed algorithm of operation and the developed structure of the control system ensure accurate and trouble-free operation of the installation. Taking into account the possibilities of emergency situations in the algorithm ensures a reduction in the share of defective finished products, which is confirmed by production tests.

Conclusion: The proposed approach to emergency diagnostics can be effectively used in the design of control systems of devices implementing similar product processing technologies, as well as in computer training complexes for training food production personnel in the diagnosis and elimination of emergency situations.

KEYWORDS

the sterilization process of canned food, automated control system, algorithm for diagnosing emergency situations, deviation of parameters, sensor breakage, leakproofness, reliability of the control system



ВВЕДЕНИЕ

Стерилизация является ответственным этапом в общем цикле производства консервов. Цикл стерилизации состоит из нескольких этапов: заполнение автоклава водой, загрузка расфасованного по банкам продукта в установку с нагретой водой, нагрев консервов паром до температуры стерилизации, этапа стерилизации при поддержании заданного давления, этапа охлаждения продукта холодной водой, извлечения продукта и слива воды из аппарата¹. На каждом из перечисленных этапов может возникнуть нештатная ситуация.

Российские исследователи (Бабарин, 1994; Выскубов, 1996; Власов, 2010; Кайченев, 2011; Ахмедов, 2011) в своих работах подробно исследуют процесс регулирования технологических параметров в процессе стерилизации, но не уделяют должного внимания, вопросу как должна вести себя система управления во время нештатных ситуаций (аварий). Зарубежные публикации (Silva et al., 1992; Ghani et al., 2001; Farid et al., 2004; Gonçalves et al., 2005; Siritwattanayotin et al., 2006; Miri et al., 2008; Shamsavand et al., 2009; Llave et al., 2012) демонстрируют, что их авторов в большей степени интересуют вопросы связанные с технологией стерилизации продукции, а публикаций связанных с автоматизацией процесса стерилизации и, в частности, связанных с вопросами повышения надежности таких систем, нет.

Несмотря на отсутствие конкретных примеров использования инструментов и методов повышения надежности и безаварийной работы систем управления процессом стерилизации консервов, существуют известные подходы для решения подобных задач, опробованные в других областях промышленности (Abid et al., 2021), поэтому нужно провести исследование по эффективности применения данных методов для указанной области пищевой промышленности.

Для всестороннего понимания особенностей технологического процесса стерилизации консервов в России и выявления наиболее уязвимых мест с точки зрения потери качества продукта и появления брака были проанализированы работы ведущих отечественных авторов по вопросам технологии процесса стерилизации консервов. В работах Асмаева М.С. и Корнилова Ю.Г.², Грачёва Ю.П. с соавторами³ описана математическая модель процесса стерилизации консервов, которая показывает взаимосвязь физических параметров в процессе стерилизации и их влияние на точность ведения всего технологического процесса. Аминов М.С. с соавторами⁴ и Зонин В.Г.⁵ описали технологию и конструкцию аппаратов для стерилизации консервов, их особенности и принцип действия, а также выделили наиболее важные элементы конструкции с точки зрения надёжности. Флауменбаума Б.Л.⁶ и Бабарина В.П.⁷ подробно описали технологию стерилизации консервов и последствия, к которым могут привести отклонения технологических параметров от заданных значений. Существующая литература позволяет отнести к перечню аварийных ситуаций отклонение регулируемых технологических параметров (температуры и давления) от заданных значений, контроль обрыва в цепи датчиков (температуры и давления) и выход из строя элементов регулирования (регулирующих и запорных клапанов).

Цель данного исследования: предложить подход к повышению надежности и безаварийности в работе системы автоматизированного управления процессом стерилизации консервов.

Исследовательский вопрос: Какие недостатки существуют в современных системах автоматизированного управления процессом стерилизации консервов и какими способами можно устранить выявленные проблемы.

¹ Флауменбаум, Б.Л., Танчев, С.С., & Гришин, М.А. (1986). *Основы консервирования пищевых продуктов*. Москва: Агропромиздат.

² Асмаев, М.П., & Корнилов, Ю.Г. (1982). *Моделирование процессов пищевых производств*. Москва: Лёгкая и пищевая промышленность.

³ Грачёв, Ю.П., Тубольцев, А.К., & Тубольцев, В.К. (1984). *Моделирование и оптимизация тепло- и массообменных процессов пищевых производств*. Москва: Лёгкая и пищевая промышленность.

⁴ Аминов, М.С., Аминова, Э.М., & Горун, Е.Г. (1987). *Производство консервов*. Москва: Агропромиздат.

⁵ Зонин, В.Г. (2008). *Современная технология мясных консервных продуктов*. СПб.: Профессия.

⁶ Флауменбаум, Б.Л. (1981). *Теоретические основы стерилизации консервов: учебное пособие для вузов*. Киев: Высшая школа.

⁷ Бабарин, В.П. (2006). *Стерилизация консервов: справочник*. Санкт-Петербург: ГИОРД.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Исследованию подлежат вопросы, связанные с диагностикой и предупреждением аварийных ситуаций во время выполнения технологического процесса стерилизации консервов. Исследованы различные режимы работы системы автоматизированного управления процессом стерилизации консервов в автоклаве при стерилизации в воде с противодавлением, в результате которых авторами выделены типовые аварийные ситуации, которые необходимо предупреждать заранее для безопасной работы системы.

Инструменты и методы

Из множества известных методов диагностики и обнаружения неисправностей, описанных в литературе (Park et al., 2020), для решения проблемы повышения общей надежности и безаварийной работы системы автоматизированного управления процессом стерилизации консервов, целесообразным является подход связанный с внесением изменений в структуру системы управления, а также применение технического диагностирования в процессе эксплуатации путем доработки общего алгоритма управления и интеграции в него подпрограмм диагностики и предупреждения аварийных ситуаций.

При разработке систем автоматизированного управления технологическим процессом необходимо уделять внимание не только поддержанию параметров технологического процесса с заданными показателями качества, но и глубокому и всестороннему анализу всех потенциально возможных аварийных ситуаций и способов их предотвращения. Для повышения надежности, при управлении технологическим процессом стерилизации, авторами предлагается дополнить классическую структуру автоматизированной системы управления на основе программируемого логического контроллера применением методов теории надежности при проектировании и эксплуатации подобных систем. Для выявления способов повышения надежности работы системы автоматизированно-

го управления необходимо применить совокупность средств, правил и алгоритмов технического диагностирования (Kovalev et al., 2021). Для этого преобразуем существующую структурную схему системы управления в схему расчёта надёжности контуров управления и, на основании исходных данных (число элементов системы, коэффициент условий их применения, интенсивность отказов элементов), рассчитываем вероятность безотказной работы каждого элемента в отдельности, каждому каналу регулирования и системы управления в целом. На основании расчётов готовятся рекомендации для изменения структуры и состава элементов системы, с целью повышения показателей надежности всей системы в целом.

Кроме аппаратных изменений в системе управления авторами предлагается дополнить общий алгоритм работы системы автоматизированного управления процедурами предупреждения возникновения аварийных ситуаций в ходе выполнения технологического процесса стерилизации консервов. Эффективным будет интегрировать в существующую программу управления алгоритмы технического диагностирования, которые должны обеспечивать дополнительную проверку состояния системы (допустимое, предаварийное, аварийное) и ускорить поиск неисправности. Результаты диагностики применяют при прогнозе нежелательных событий и при поиске причин отказов и аварий. Это особенно важно при расследовании аварий, выявлении причин их возникновения. Определение состояний, предшествующих аварии, а следовательно, и первопричины ее возникновения, исключительно важно для недопущения подобных аварий в будущем и на аналогичных системах. В исследовании применено техническое диагностирование в процессе эксплуатации. При этом в исследовании применены, как тестовые методы диагностирования в начале производственного цикла, так и функциональные методы диагностирования во время непосредственной работы системы управления.

Общая программа системы автоматизированного управления и подпрограммы диагностики и предупреждения аварийных ситуаций выполнены на языке СFC с использованием общепринятых элементов программирования стандарта МЭК 61131-3⁸.

⁸ Петров, И.В. (2003). *Программируемые контроллеры. Стандартные языки и инструменты*. Москва: СОЛОН-Пресс.

Анализ и валидация данных

Анализ надёжности системы управления будет выполнен через расчёт показателя вероятности безотказной работы отдельных контуров регулирования системы. Тот контур регулирования, который имеет наименьшую вероятность безотказной работы, определит надёжность системы в целом. Если показатель надёжности нас удовлетворяет, то систему можно оставить без изменений, если нет, то систему преобразуют и дополняют, с целью повышения надёжности.

Эффективность использования процедур предупреждения возникновения аварийных ситуаций в ходе выполнения технологического процесса стерилизации консервов должна быть подтверждена производственными испытаниями в течении установленного периода использования системы автоматического управления.

РЕЗУЛЬТАТЫ

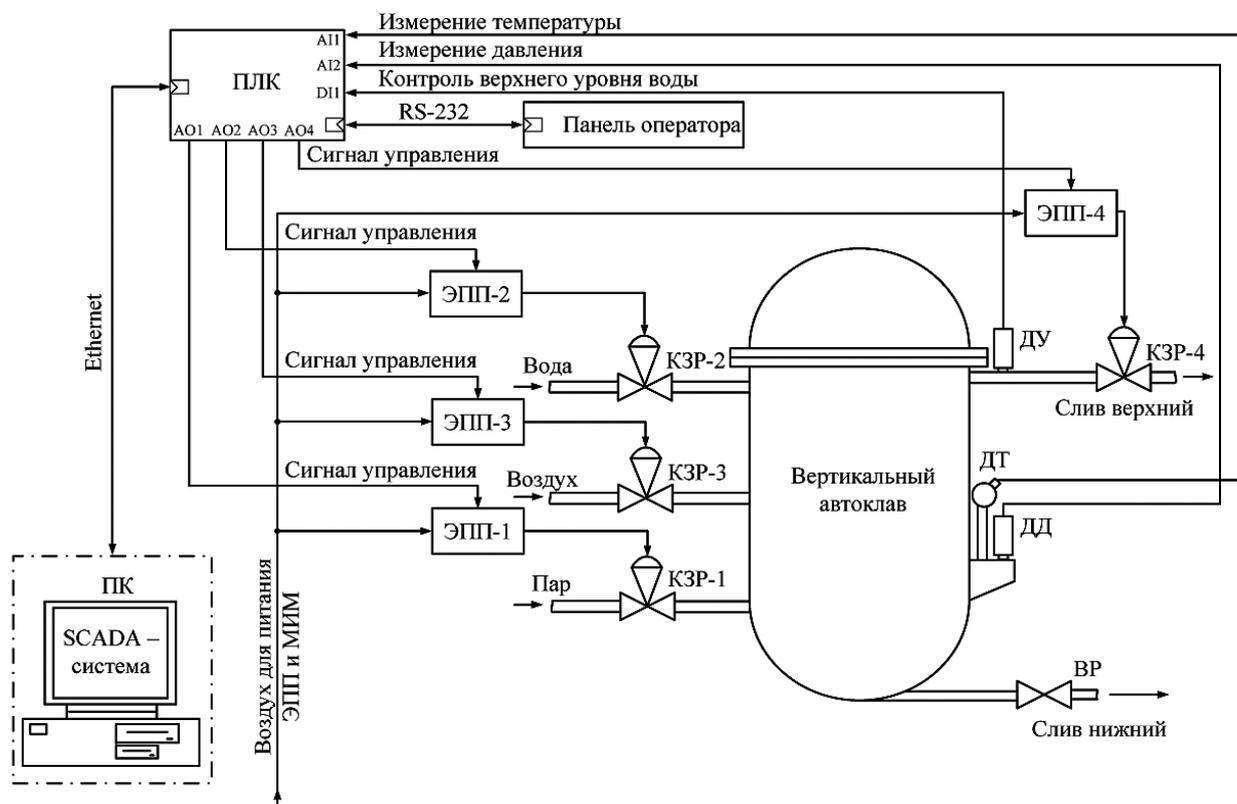
Анализ структуры системы управления с точки зрения надёжности. Система управления (Рисунок 1) автоматически регулирует в автоклаве температуру и давление по заданной программе. Система включает в себя автоматизированное рабочее место оператора и обеспечивает автоматическое выполнение основных стадий процесса стерилизации консервов. В качестве главного управляющего устройства в системе используется программируемый логический контроллер (ПЛК), который позволяет построить систему управления требуемого уровня сложности (Мокрушин, 2019).

В системе автоматизированного управления (Рисунок 1) предусмотрено:

- (1) измерение температуры и давления, а также контроль верхнего уровня воды;
- (2) изменение в подающих трубопроводах расходов холодной воды, пара и воздуха посредством регулирующих клапанов.

Рисунок 1

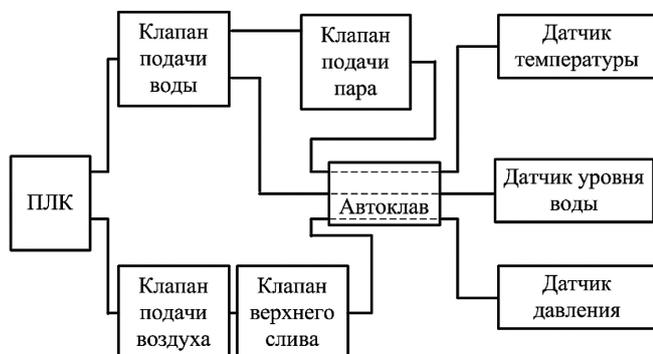
Структурная схема системы автоматизированного управления



Примечание. ДТ – датчик температуры; ДД – датчик давления; ДУ – датчик уровня воды; ПЛК – программируемый логический контроллер; ПК – персональный компьютер; RS-485 и Ethernet – интерфейсы связи; ЭПП – электропневматический позиционер; КЗР – клапан запорно-регулирующий с мембранным исполнительным механизмом; ВР – вентиль ручного управления.

Рисунок 2

Схема расчёта надёжности системы автоматизированного управления



При расчете показателей надёжности (Рисунок 2), на этапе проектирования системы, полагают соединение элементов системы последовательным, а вероятность безотказной работы — подчиняющийся экспоненциальному закону распределения вероятности.

Согласно расчетной схеме (Рисунок 2) система автоматизированного управления процессом стерилизации консервов представляется в виде последовательного соединения трёх элементов: регулирующих клапанов, технологического аппарата и датчиков регулируемых величин. Таким образом, схема расчёта надёжности будет содержать последовательно соединённые контроллер и объект регулирования. Так как в контроллере реализовано три одноконтурные системы автоматического регулирования (температура, давление, уровень), то следует рассчитать вероятность безотказной работы каждой из этих одноконтурных систем. Та одноконтурная система, которая имеет наименьшую вероятность безотказной работы, определяет надёжность системы в целом.

Описание причин возникновения аварийных ситуаций в системе

Измерение температуры греющей среды и внутреннего давления в автоклаве осуществляется датчиками ДТ и ДД (Рисунок 1). Сигналы с датчиков используются для анализа основных аварийных ситуаций в процессе стерилизации консервов — от-

клонение температуры и давления от установленных пределов. Эти аварийные ситуации всегда учитываются, так как отклонения параметров прописаны в техническом задании и на этом заостряется особое внимание. Однако при проектировании систем управления может быть упущен анализ возникновения аварийной ситуации по причине поломки или обрыва одного из датчиков, что может привести к неоднозначной работе программируемого логического контроллера.

Кроме того, при проектировании систем управления многие не предусматривают контроль верхнего уровня воды в автоклаве, что не позволяет в автоматическом режиме производить заполнение автоклава водой во время подготовительных операций. Согласно Рисунок 1 верхний уровень можно контролировать по датчику (ДУ), срабатывающему на контакт с водой. Если в системе не предусмотреть контроль верхнего уровня воды, то контроль за данным параметром, во время подготовительных операций, остаётся за оператором. Человеческий фактор может привести к недостаточному заполнению автоклава водой и к потере верхнего слоя банок, которые не находились полностью в воде во время процесса стерилизации.

Авария может произойти и по причине если клапан нижнего слива ВР (Рисунок 1) пропускает и часть воды выйдёт во время выполнения технологического процесса. Поэтому система управления должна проводить тест на герметичность запорно-регулирующей арматуры в начале каждого цикла стерилизации. Потеря герметичности клапанов случается по причине того, что со временем они изнашиваются и начинают понемногу пропускать через себя регулирующую среду, даже в полностью закрытом состоянии. Из-за этого на систему управления начинают воздействовать возмущающие воздействия, которые она должна отрабатывать. Но если система не имеет достаточного астатизма, или её ресурса уже недостаточно для компенсации возмущений, то начнётся отклонение технологических параметров от заданной траектории. Авторами предлагается решить данную проблему на начальном этапе её проявления. Для этого в алгоритм работы системы управления предлагается добавить процедуру проверки герметичности автоклава, которую можно назвать «опрессовкой»⁹.

⁹ Жежера, Н.И. (2005). *Автоматизация испытаний изделий на герметичность: учебное пособие*. Оренбург: ГОУ ОГУ.

Введение подпрограмм диагностики аварийных ситуаций.

Все подпрограммы контроля аварийных ситуаций имеют приоритет над управляющими сигналами и могут блокировать сигналы управления основной программы регулирования, подав в случае возникновения аварии на соответствующий выход контроллера нулевой сигнал управления.

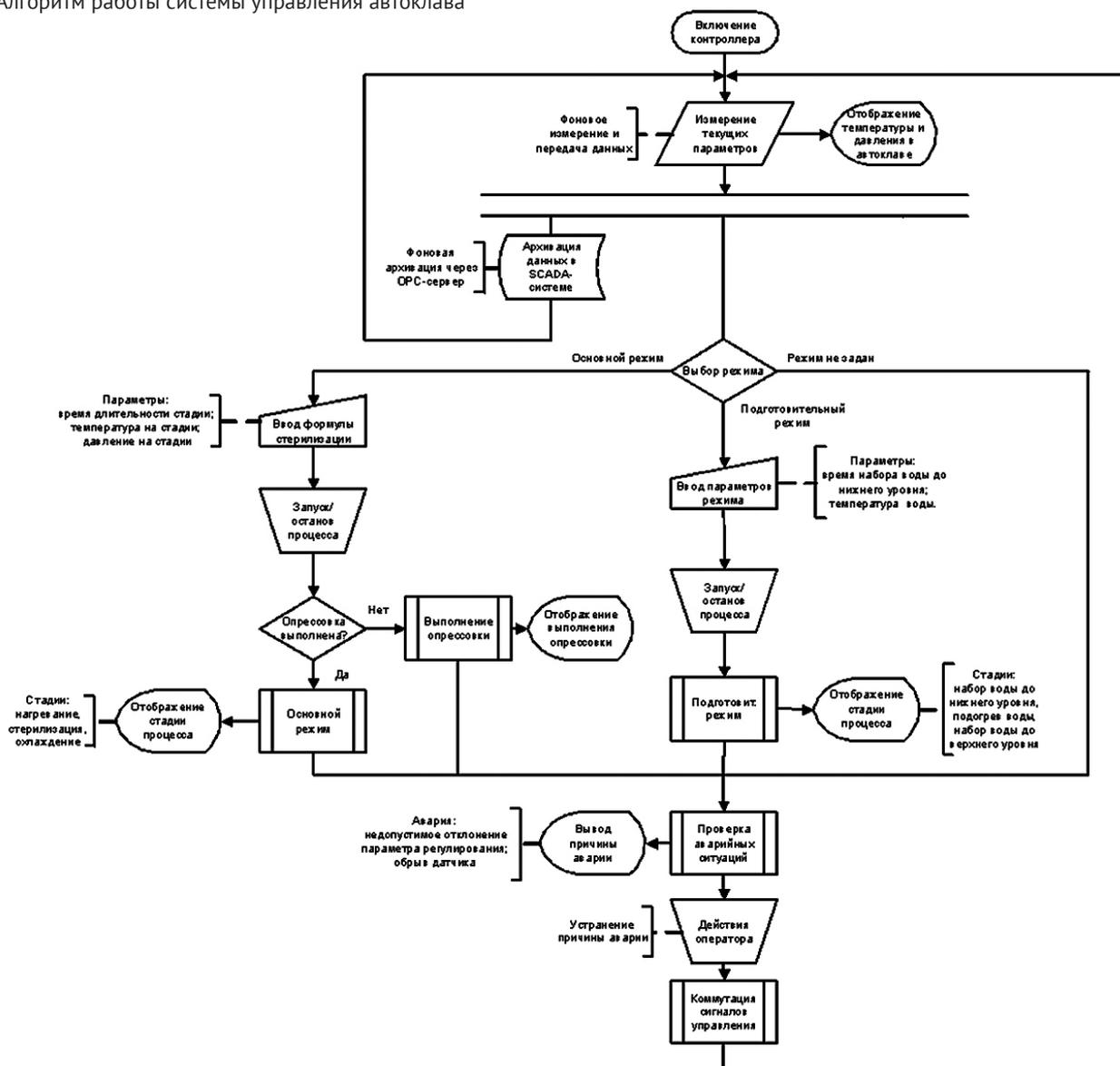
С учётом проверки и предупреждения возникновения аварийных ситуаций, подготовительный режим должен включать в себя дополнительно процедуры, а во время выполнения основного режима, в общий алгоритм должны быть добавлены процедуры рабо-

ты автоклава в аварийных ситуациях, при которых система не может продолжать работу и прекращает управление исполнительными механизмами, переходя в ручное управление оператором. При этом блокируется работа автоматических клапанов.

К аварийным ситуациям относят недопустимое отклонение технологических параметров (более 5% от заданного значения), обрыв любого датчика, нарушение герметичности автоклава.

Графическое представление алгоритма работы системы управления автоклава во время производственного цикла представлено на Рисунке 3. В отличие от базового алгоритма работы системы

Рисунок 3
Алгоритм работы системы управления автоклава



автоматизированного управления, предлагаемый авторами алгоритм дополнен подпрограммой тестового диагностирования в начале производственного цикла (подпрограмма «опрессовка») и подпрограммой функционального диагностирования во время непосредственной работы системы управления (подпрограмма проверки аварийных ситуаций).

Фрагмент подпрограмма проверки аварийных ситуаций во время основного режима работы приведен на Рисунке 4.

При обнаружении обрыва датчика система автоматически блокирует работу выходных устройств контроллера. С этого момента технологический процесс может быть продолжен только в ручном режиме по показаниям автономных приборов контроля (термометру и манометру).

При некритическом отклонении технологического параметра от заданного значения (выше 1%, но ниже 5%) система выдает предупреждение на дисплей панели оператора (Рисунок 1), при этом работа исполнительных механизмов не блокируется. Оператор может предпринять

действия по устранению причины возникновения аварии. При достижении отклонения параметра выше критического значения (свыше 5%), система блокирует работу в автоматическом режиме исполнительных механизмов и переходит в ручной режим управления.

Недопустимые отклонения чаще всего происходят по причине поломки исполнительных механизмов, когда система управления больше не может их автоматически устранять. Согласно требованиям, к процессу регулирования на устранение аварии подобного типа отводится 1 минута, после чего система перейдет в ручной режим управления.

Кроме того, авторами статьи предлагается ввести в подготовительный режим основной программы подпрограмму проверку герметичности блоков регулирующей арматуры. Таким образом, подготовительный режим будет включать следующие обязательные пункты: заполнение автоклава водой до нижнего уровня (выполняется по времени), нагрев воды до температуры продукта, загрузка продукта в автоклав и закрытие крышки (остаются ручными операциями), заполнение автоклава водой до срабатывания датчика верхнего уровня,

Рисунок 4
Подпрограмма диагностики аварийных ситуаций

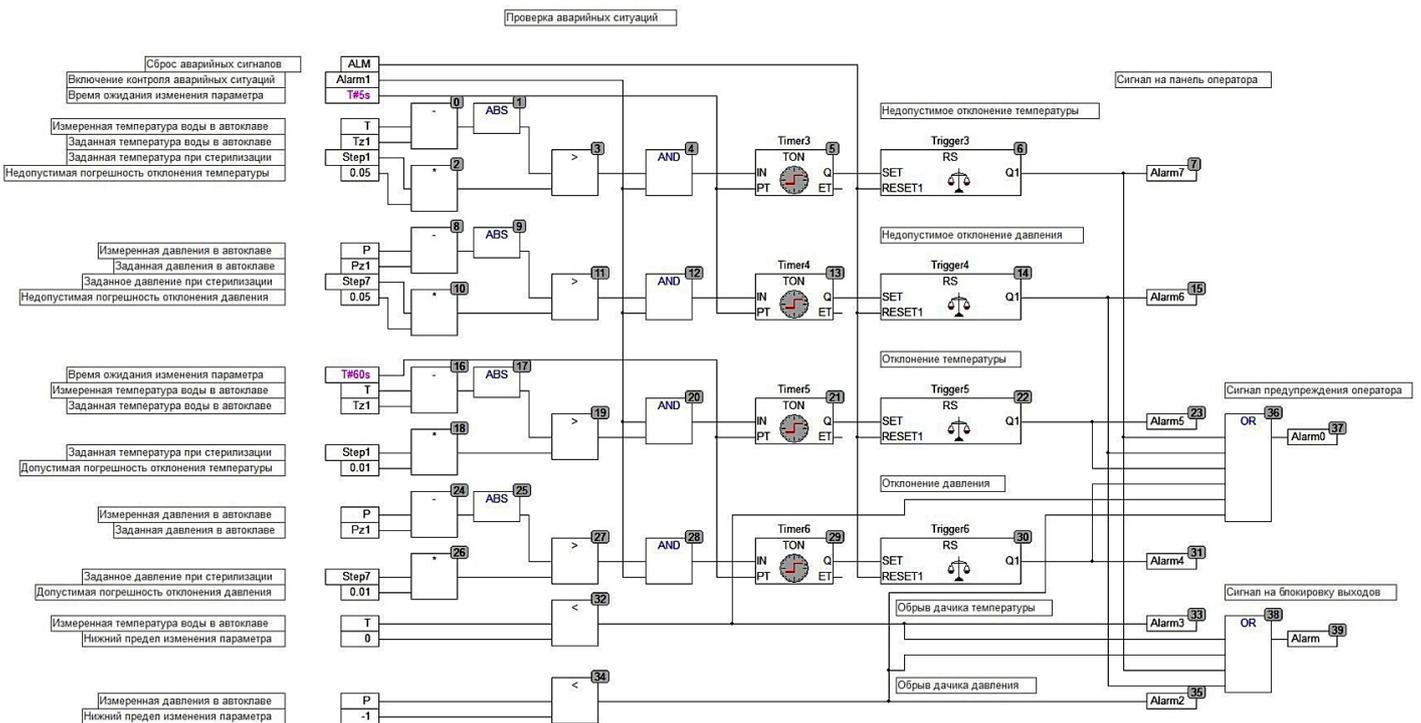
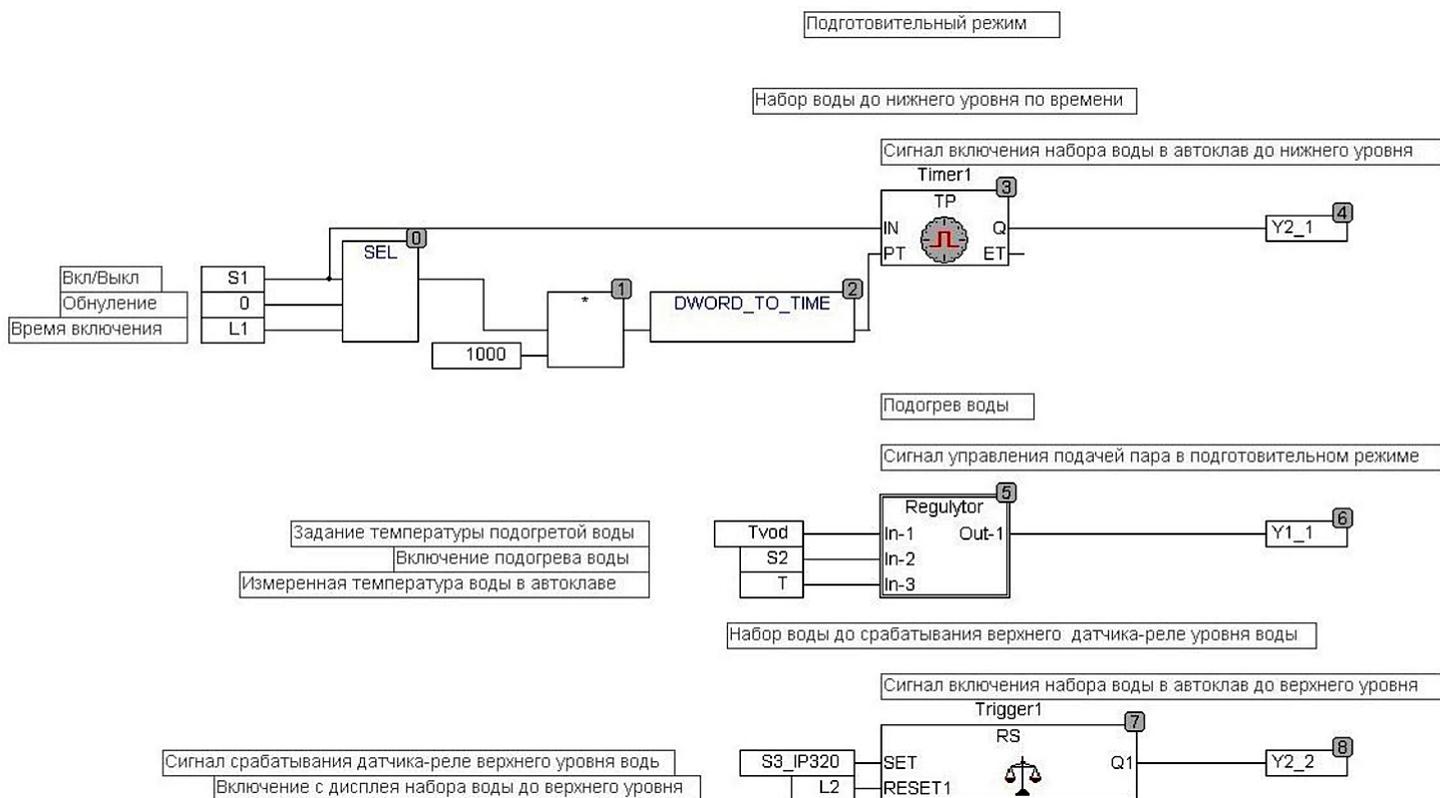


Рисунок 5

Подпрограмма подготовительного режима



«опрессовка» (проверка герметичности) автоклава с закрытой крышкой. Фрагмент подпрограммы подготовительного режима приведен на Рисунке 5.

Подпрограмму проверки автоклава на герметичность (Рисунок 6) предлагается выполнять непосредственно перед активацией основного режима работы. Сигналом о выполнении «опрессовки»

служит значение TRUE. Подпрограмма проверяет автоклав на герметичность и тем самым предупреждает возможность возникновения аварийных ситуаций, связанных с потерей давления во время работы установки, если регулирующий или ручной клапан не герметично закрыт или пропускает. Кроме того, если будет плохо закрыт клапан нижнего слива, это может привести к снижению уровня

Рисунок 6

Подпрограмма проверки автоклава на герметичность



воды в автоклаве и браку верхнего слоя банок, которые не находились в воде.

Система автоматизированного управления технологическим процессом стерилизации консервов в автоклаве (Рисунок 1), согласно дополненному алгоритму работы (Рисунок 3), способна обеспечить контроль и предотвращение наступления аварийных ситуаций для обеспечения безопасной работы установки, блокировку регулирования и выдачу сигнала с указанием причины аварии на панели оператора при аварийном состоянии системы, своевременный переход на ручное управление в аварийном режиме.

Анализ данных

Согласно приведенной ранее схеме расчета надежности системы автоматизированного управления (Рисунок 2) можно рассчитать вероятность безотказной работы электроавтоматики и определить вероятность безотказной работы объекта регулирования по различным каналам, таким образом выделив наиболее уязвимое место в системе управления с точки зрения надёжности.

Имеем следующие данные, полученные из технических характеристик используемых средств автоматизации:

- вероятность безотказной работы ПЛК равна 0,904;
- вероятность безотказной работы датчика температуры равна 0,927;
- вероятность безотказной работы датчика уровня воды равна 0,935;
- вероятность безотказной работы датчика давления равна 0,886;
- вероятность безотказной работы регулирующего клапана равна 0,964;
- вероятность безотказной работы самого автоклава равна 0,99.

Так как в каждом канале все элементы соединены последовательно (Рисунок 2), то вероятность безотказной работы системы управления, по различным каналам, находится методом перемножения коэффициентов вероятности безотказной работы элементов, входящих в данный канал, без учёта ПЛК:

- вероятность безотказной работы канала регулирования температуры 0,862;

- вероятность безотказной работы канала регулирования уровня 0,901;
- вероятность безотказной работы канала регулирования давления 0,824.

Так как по каналу регулирования давления вероятность безотказной работы наименьшая, то вероятность безотказной работы всей системы регулирования в целом, с учётом контроллера, равна 0,745.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведённый ранее, в данной статье, расчёт безотказной работы каналов системы автоматизированного управления показал, что наиболее уязвимым местом системы является канал регулирования давления, по причине низкой вероятности безотказной работы датчика давления. Исходя из этого было предложено интегрировать в канал регулирования давления параллельно резервный датчик. Это повысит вероятность безотказной работы канала регулирования давления до 0,918, а вероятность безотказной работы всей системы регулирования в целом с 0,745 до 0,83.

Предлагаемый в статье дополненный алгоритм работы системы автоматизированного управления, с точки зрения эффективности, прошёл промышленные испытания на консервном заводе на автоклавах марки Б6-КАВ-В2 в течение года. За время эксплуатации не было отмечено получения брака продукции по причине отказа системы автоматизированного управления. Из 32 зафиксированных случаев наступления нештатных ситуаций, по причине аварий в системе подачи в автоклав теплоносителя, в 26 случаях получилось сохранить продукт благодаря своевременному оповещению оператора о наступлении аварийной ситуации со стороны системы автоматизированного управления.

Исследования ведущих отечественных и зарубежных специалистов в области стерилизации консервов далеко продвинулись в направлении разработки моделей для компьютерной симуляции данного процесса (Kauchenov et al., 2020; Zhuk et al., 2021; Pitarchet et al., 2021; Szpiceret et al., 2023), однако в разработанных моделях отсутствует диагностика аварийных ситуаций, предложенная авторами статьи, которая может эффективно использоваться при проектировании систем управления стерили-

лизационных аппаратов, а также в компьютерных тренажерных комплексах для обучения персонала пищевых производств диагностике и устранению аварийных ситуаций. При обнаружении наступления аварийной ситуации система предупреждает оператора и блокирует работу регулирующих клапанов. После устранения неисправности процесс стерилизации можно продолжить в автоматическом режиме, либо завершить по показаниям приборов, в том числе установленных по месту. При таком подходе появление брака продукции и ущерб сведён к минимуму.

В результате исследований поставленная цель была достигнута. Предложенный подход к повышению надежности системы показал ожидаемый результат, так как вероятность безотказной работы системы рассчитывается математическими методами. Применение подпрограмм диагностики и предупреждения аварийных ситуаций, на начальном этапе проектирования, не являлось очевидным решением для повышения безаварийности работы системы управления, и требовало проведения производственных испытаний, по результатам которых была установлена эффективность и целесообразность применения предложенных подпрограмм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью исследования являлась выработка подхода к повышению надёжности и безаварийности работы системы автоматизированного управления процессом стерилизации консервов. Для повышения надёжности авторами статьи предложено внести изменения в состав и структуру систему управления (добавить параллельно существующему резервный датчик давления) чтобы повысить общий показатель надёжности системы со значения 0,745 до 0,83, что является достаточным показателем для подобных систем.

Для безаварийной работы системы в существующий алгоритм добавлены подпрограммы технического диагностирования и предупреждения аварийных ситуаций: подпрограмма контроля обрыва датчиков, подпрограмма контроля недопустимого отклонения регулируемых параметров от нормы, подпрограмма автоматического заполнения автоклава водой перед началом технологического про-

цесса, подпрограмма проверки автоклава на герметичность. Введение в существующую программу предложенных авторами статьи подпрограмм диагностики и предупреждения аварий позволило сократить количество аварийных ситуаций во время процесса стерилизации консервов на 81 %, что подтверждается производственными испытаниями.

Предлагаемая структура системы управления и подпрограммы диагностики и предупреждения аварийных ситуаций могут быть использованы в качестве примера при автоматизации подобных технологических процессов в других технологических установках.

Алгоритм диагностики и предупреждения об аварийных ситуациях, предложенный авторами статьи, будет применяться на компьютерных тренажерных комплексах для обучения персонала пищевых производств диагностике и устранению аварийных ситуаций.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Мокрушин Сергей Александрович: концептуализация; подготовка и редактирование рукописи.

Благовещенский Иван Германович: разработка методологии исследования; редактирование рукописи.

Благовещенская Маргарита Михайловна: администрирование и валидация данных.

Охупкин Сергей Иванович: проведение исследования; создание черновика рукописи.

Благовещенский Владислав Германович: проведение исследования; валидация данных.

ЛИТЕРАТУРА

- Ахмедов, М.Э. (2011). *Разработка и создание новых ресурсосберегающих способов консервирования и эффективных устройств и аппаратов для тепловой стерилизации консервов* [дис. д-ра техн. наук: 05.18.12]. Махачкала: Дагестанский государственный технический университет.
- Бабарин, В.П. (1994). *Тепловая стерилизация плодоовощных консервов (теория и практика)* [дис. д-ра техн. наук]. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт консервной и овощной промышленности.
- Власов А.В. (2010). *Повышение эффективности стерилизации консервов паром в автоклавах* [дис. канд. техн. наук]. Мурманск: Мурманский государственный технический университет.
- Выскубов Е.В. (1996). *Разработка микропроцессорных систем управления периодическими процессами тепловой обработки пищевых продуктов (на примере САУ стерилизации консервов)* [дис. канд. техн. наук]. Краснодар: Кубанский государственный технологический университет.
- Кайченев, А.В. (2011). *Разработка и исследование модернизированного способа стерилизации консервов из гидробионтов* [дис. канд. техн. наук]. Мурманск: Мурманский государственный технический университет.
- Мокрушин, С.А. (2019). *Разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве* [дис. канд. техн. наук]. Москва: Московский государственный университет пищевых производств.
- Abid, A., Khan, M.T. & Iqbal, J. (2021) A review on fault detection and diagnosis techniques: basics and beyond. *Artif Intell Rev*, 54, 3639–3664. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09934-2>
- Farid, M., & Ghani, A. G. A. (2004). A new computational technique for the estimation of sterilization time in canned food. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(4), 523–531. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2003.08.007>
- Ghani, A. G. A., Farid, M. M., Chen, X. D. & Richards, P. (2001). Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 147–156. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00150-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00150-3)
- Gonçalves, E. C., Minim, L. A., Coimbra, J. S. R. & Minim, V. P. R. (2005). Modeling sterilization process of canned foods using artificial neural networks. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(12), 1269–1276. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.04.001>
- Kaychenov, A., Vlasov, A., Maslov, A., Selyakov, I., & Glukhikh, Y. (2020). Development of an Autoclave Thermal Processes Model for the Simulator of Canned Food Sterilization Process. *KnE Life Sciences*, 437–449. <https://doi.org/10.18502/cls.v5i1.6103>
- Kovalev, I., Kovalev, D., Testoyedov, N., Voroshilova, A., & Bartenev, V. (2021). An approach to reducing the probabilities of dangerous failures in production control systems. *In AIP Conference Proceedings*, 2402(1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0071400>
- Llave, Y. A., Hagiwara, T., & Sakiyama, T. (2012). Artificial neural network model for prediction of cold spot temperature in retort sterilization of starch-based foods. *Journal of Food Engineering*, 109(3), 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.024>
- Miri, T., Tsoukalas, A., Bakalis, S., Pistikopoulos, E. N., Rustem, B. & Fryer, P. J. (2008). Global optimization of process conditions in batch thermal sterilization of food. *Journal of Food Engineering*, 87(4), 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.032>
- Park, Y. J., Fan, S. K. S., & Hsu, C. Y. (2020). A review on fault detection and process diagnostics in industrial processes. *Processes*, 8(9), 1123. <https://doi.org/10.3390/pr8091123>
- Pitarch, J. L., Vilas, C., de Prada, C., Palacín, C. G., & Alonso, A. A. (2021). Optimal operation of thermal processing of canned tuna under product variability. *Journal of Food Engineering*, 304, 110594. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110594>
- Shahsavand, A., & Nozari, Y. (2009). Simulation of a continuous thermal sterilization process in the presence of solid particles. *Scientia Iranica. Transaction C, Chemistry, Chemical Engineering*, 16(1), 29.
- Silva, C. Hendrickx, M., Oliveira, F. & Tobback, P. (1992). Optimal sterilization temperatures for conduction heating foods considering finite surface heat transfer coefficients. *Journal of Food Science*, 57(3), 743–748. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb08086.x>
- Siriwattanayotin, S., Yoovidhya, T., Meepadung, T. & Ruenglerpanyakul, W. (2006). Simulation of sterilization of canned liquid food using sucrose degradation as an indicator. *Journal of Food Engineering*, 73(4), 307–312. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.08.008>
- Szpicier, A., Bińkowska, W., Wojtasik-Kalinowska, I., Salih, S. M., & Póltorak, A. (2023). Application of computational fluid dynamics simulations in food industry. *European Food Research and Technology*, 249(6), 1411–1430. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04231-y>
- Zhuk, A., Stolyanov, A., Kaychenov, A., Kuranova, L., & Grokhovsky, V. (2021). Software for calculating the actual lethality of canned food heat treatment processes: development and application. *In E3S Web of Conferences* (vol. 273, p. 13002). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127313002>