

УДК 664.951.6 : 574.5

А.В. Кайченoв, А.В. Власoв, А.А. Маслов, И.Ю. Селяков, А.Р. Власoвa

Разработка режимов стерилизации консервов из гидробионтов с использованием средств вычислительной техники

A.V. Kaychenov, A.V. Vlasov, A.A. Maslov, I.Yu. Selyakov, A.R. Vlasova

Development of sterilization regimes of canned hydrobionts using computer

Аннотация. Описаны основные этапы подбора режима стерилизации консервов с помощью программы "Подбор режимов стерилизации консервов" (PRSC), разработанной сотрудниками кафедры автоматической и вычислительной техники МГТУ. Программа позволяет определять параметры энергоэффективных режимов стерилизации в автоматическом режиме. Показано, что с применением программного средства PRSC возможно сократить количество пробных варок при подборе режима стерилизации за счет использования результатов численного моделирования. Тестирование программного продукта показало его эффективность при разработке режимов стерилизации консервов.

Abstract. The paper describes the main stages of the sterilization regime development by means of the PRSC program worked out by the research group of the department of automatic equipment and computer science MSTU. This program allows to develop sterilization regimes with the high level of energy efficiency. The required number of test sterilization processes can be reduced using the PRSC. The results of the PRSC's testing show that it can be used for development of the sterilization regime.

Ключевые слова: автоматика, стерилизация, автоклав, оптимизация, разработка режима стерилизации
Key words: automatics, sterilization, autoclave, optimization, development of the sterilization regime

1. Введение

Обеспечение населения качественными и безопасными продуктами из гидробионтов является стратегической задачей рыбной отрасли России. Создание новых видов консервов, использование новых видов консервной тары предполагает разработку научно обоснованных формул стерилизации, утверждаемых затем в установленном порядке. Разработка режима стерилизации зачастую требует применения значительных энергетических, материальных и временных ресурсов. Трудоемкость этого процесса обусловлена проведением большого количества автоклавоварок, необходимых для получения и утверждения режимов стерилизации. Очевидно, что упрощение процедуры разработки возможно при использовании численного моделирования процесса стерилизации. Использование модели процесса, представляющего совокупность моделей тепловых процессов, проходящих в автоклаве и в банке с продуктом, позволяет значительно сократить количество необходимых автоклавоварок, уменьшить количество потребляемой электроэнергии и время работы установки (Кайченoв и др., 2012b).

Использование адекватных моделей позволит получить оптимальный температурно-временной режим стерилизации, за счет этого будет достигнуто повышение эффективности стерилизационных установок, сокращение расхода ресурсов на процесс стерилизации, повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции, уменьшение экологической нагрузки на окружающую среду.

Научно-исследовательская группа кафедры автоматической и вычислительной техники (АиВТ) МГТУ совместно с сотрудниками кафедры технологий пищевых производств (ТПП) ведет разработку и исследование энергоэффективных способов проведения технологических процессов (Кайченoв и др., 2013). В 2011 г. сотрудниками кафедры АиВТ разработано программное обеспечение Modern_Optim, позволяющее разрабатывать оптимальные режимы водной стерилизации консервов "Печень трески натуральная" в банке Impress для автоклава АВК-30М (Кайченoв и др., 2012a). В настоящее время на кафедре АиВТ разработано программное обеспечение PRSC, осуществляющее подбор оптимального режима стерилизации консервов для определенного вида продукции и стерилизационного оборудования. Аналогичной разработкой является программа для ЭВМ OPT-PROx, осуществляющая подбор параметров уравнения теплопроводности, а также расчет оптимального режима стерилизации консервов по выбранному критерию (минимального времени, наилучшей кулинарной готовности) (Abakarov, Nunez, 2012). Таким образом, разработка программного средства для ЭВМ, обеспечивающего подбор оптимального режима стерилизации консервов, является актуальной задачей.

2. Объекты и методы исследований

Объектами исследования являются: оптимальные режимы стерилизации консервов, получаемые на основе математических моделей тепловых процессов в автоклаве и банке с продуктом.

Исследователи в области стерилизации пищевых продуктов проводят моделирование тепловых процессов, проходящих в консервной таре и автоклаве на основании решения дифференциальных уравнений. Эти уравнения составляются на основании законов сохранения массы и энергии, и для процессов, связанных с распределением тепла в автоклаве и консервах, описываются уравнением теплопроводности для цилиндра, сферы или параллелепипеда (Абакаров, Филиппович, 2012).

Стерилизационная камера автоклава и банка с продуктом – объекты, математическое описание которых усложняется наличием множества трудно учитываемых факторов (начальные температуры стенок стерилизационной камеры и продукта, температура теплоносителя, давление в парогенераторе, зависимость теплоемкости участвующих в теплообмене объектов от параметров процесса, фазовые превращения теплоносителя, форма и расположение клетей в аппарате, размеры и форма банок, форма стерилизационной камеры и т.п.). Строгий вывод математического описания таких объектов затруднен, а получаемое решение весьма громоздко и неудобно в использовании (Власов, 2010).

Другой подход к построению моделей тепловых процессов, проходящих в банке с продуктом и автоклаве, – описание объектов в терминах "вход – выход" с помощью передаточных функций (1), построенных по экспериментальным зависимостям входных и выходных параметров процесса.

$$W(p) = K \cdot (\tau_m \cdot p^m + \tau_{m-1} \cdot p^{m-1} + \dots + \tau_1 \cdot p + 1) / (T_n \cdot p^n + T_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + T_1 \cdot p + 1), \quad (1)$$

где $T_n \dots T_1$, $\tau_m \dots \tau_1$ – постоянные времени; p – оператор преобразования Лапласа; K – коэффициент передачи; m – порядок числителя; n – порядок знаменателя.

В настоящее время разработано и используется множество методов получения передаточных функций на основе экспериментальных данных. Сущность их состоит в том, чтобы построить модель, так же реагирующую на входной сигнал, как и реальная система. Очевидно, что идеального соответствия достичь невозможно, но можно получить модель невысокой сложности (1-3 порядка), отражающую существенные характеристики динамики реального процесса. Для получения такой модели требуется сравнительно небольшой объем экспериментов, которые достаточно легко реализуются. Для получения передаточной функции необходимо регистрировать входной и выходной сигналы (Власов, 2010).

Получаемые модели должны быть адекватными и корректными. На практике адекватность модели часто доказывают на основании сходства спектров выходных сигналов, получаемых как реакции на одни и те же входные сигналы реальной системы (экспериментальные данные) и ее модели (рассчитанные, аппроксимирующие и т.д. данные) (Власов, 2010).

Математическая модель строится по переходной характеристике, получаемой с выхода объекта при подаче на его вход ступенчатого сигнала. Задача идентификации объекта сводится к нахождению модели-кандидата, переходная характеристика которой схожа с реальным объектом (Власов, 2010).

Поиск параметров моделей, обеспечивающих их адекватность, в данной работе осуществлялся итерационными методами оптимизации. В результате поиска переходные процессы объектов незначительно отличались от желаемых. Алгоритм определения коэффициентов заключался в поиске (симплекс-методом) таких оптимальных значений параметров передаточной функции объекта в характерной точке, чтобы квадратичное отклонение модели от объекта за период исследования имело наименьшую величину.

Построение переходных характеристик, описываемых передаточными функциями блоков модели, проводилось с использованием численного метода Рунге – Кутты 4-го порядка с шагом 1 секунда.

3. Разработка режима стерилизации консервов

Согласно инструкции по разработке режимов стерилизации консервов из рыбы и морепродуктов (Инструкция, 1996), процесс разработки режима содержит следующие этапы: предварительный подбор режимов; лабораторное испытание, производственная проверка; оформление; согласование; представление на утверждение. Этапы предварительного подбора режима стерилизации, а также оформления режима возможно осуществить с помощью лабораторного автоклава (например, АВК-30М (Маслов и др., 2009; Кайченов и др., 2012b)), максимально моделирующего производственные условия стерилизации, комплекса по исследованию температуры в наименее прогреваемой области банки (например, Ellab), а также ЭВМ для формирования отчета по подбираемому режиму. Работу разработчика режима стерилизации на этапах предварительного подбора и оформления можно упростить при использовании программного обеспечения для ЭВМ PRSC (рис. 1).

Программа PRSC предназначена для повышения энергоэффективности процесса стерилизации консервной продукции. Согласно инструкции по разработке режимов стерилизации консервов из рыбы и

рыбных продуктов (Инструкция, 1996), при выборе значений параметров предварительного режима стерилизации консервов ориентируются на аналогичные по рецептуре и прогреваемости консервы. При этом в инструкции не прописаны действия при изменении температуры стерилизации, а также при разработке новых видов консервов. Как правило, в таких случаях проводят пробные автоклавоварки консервов.

При разработке режима стерилизации с использованием PRSC возможно сократить количество пробных автоклавоварок за счет замещения их результатами численного моделирования в программе. В программу вводятся характеристики автоклава, параметры модели продукта (передаточные функции тепловых процессов, проходящих в банке) (рис. 2) и начальные условия (температуры автоклава на моменты начала и конца процесса стерилизации, а также температура продукта при закладке в банку). После введения параметров моделей по заданным параметрам режима стерилизации (продолжительность этапов термообработки, температура греющей среды, давление в автоклаве при стерилизации, при охлаждении, фактическая летальность) и начальным условиям программа строит кривую температуры в аппарате. На основании этой зависимости и моделей тепловых процессов, проходящих в банке с продуктом, строятся временные зависимости температур в банках. Основываясь на этих данных, программой PRSC рассчитывается фактическая летальность (показатель, позволяющий количественно охарактеризовать микробиологическую эффективность режима стерилизации) по формуле (2), а также временные и энергетические затраты на процесс.

$$I_T^Z = \int_0^{\tau} \frac{dT}{T_0 - T(\tau)}, \quad (2)$$

где T_0 – базисная температура (121,1), °C; Z – число градусов, на которое необходимо изменить температуру, чтобы время термической смерти микроорганизмов изменилось в 10 раз, °C; τ – время стерилизации, с; $T(\tau)$ – вычисленное текущее значение температуры продукта в центре банки, °C.

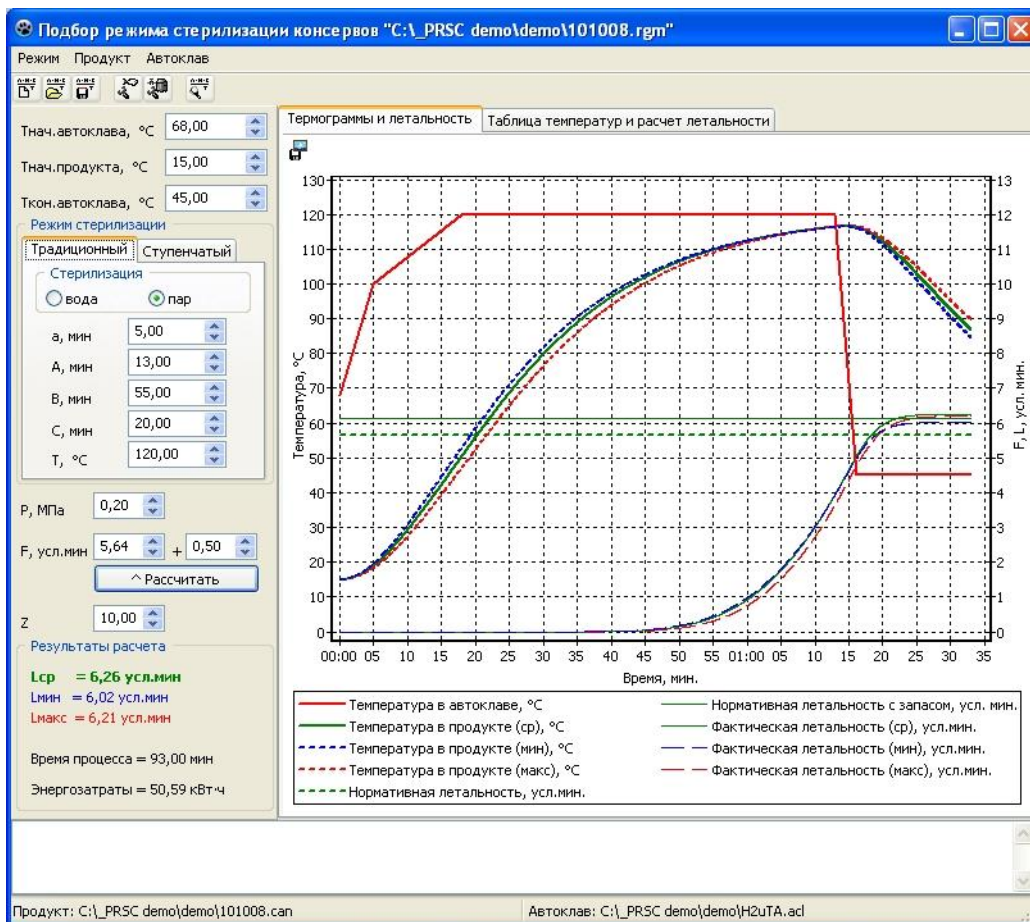


Рис. 1. Внешний вид программы PRSC

В программе PRSC осуществляется расчет нормативной (требуемой) летальности (показатель для оценки продолжительности нагревания, необходимой для гибели микроорганизмов при стерилизации консервов) по формуле.

$$F_T^Z = F_n = D_T \cdot \left(\lg \frac{C_0 \cdot V \cdot 100}{S} + X \right), \quad (3)$$

где D_T – константа выживаемости микроорганизмов при определенной температуре стерилизации T , характеризующаяся продолжительностью теплового воздействия, необходимого для уменьшения количества микроорганизмов и их спор в 10 раз, мин.; X – поправка, учитывающая отклонение числа выживших после нагревания спор от логарифмического порядка отмирания; C_0 – начальная концентрация в 1 см³ спор (клеток) микроорганизма в отношении которого рассчитывается режим стерилизации; S – допустимый бактериологический брак, %; V – объем продукта в одной единице упаковки (банке), см³.

В соответствии с инструкцией по разработке режимов стерилизации консервов из рыбы и морепродуктов (Инструкция, 1996), подобранный режим должен обеспечить выполнение неравенства $L_T^Z \geq F_T^Z$. В программе PRSC имеется возможность задать по фактическому стерилизующему эффекту запас, учитывающий максимально допустимые отклонения температурно-временных параметров процесса в меньшую сторону (рис. 1).

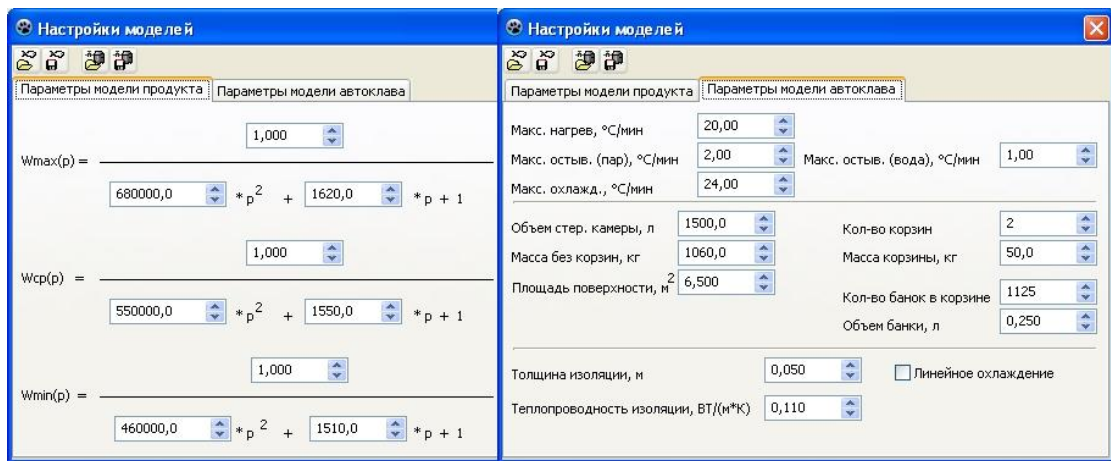


Рис. 2. Внешний вид окна программы PRSC "Настройки моделей"

Программа PRSC позволяет работать со сложными многоступенчатыми режимами стерилизации консервов (Variable Retort Temperature (VRT)), в том числе с повышенными температурами стерилизации (High Temperature Short Time (HTST)). Также в программе реализован алгоритм, позволяющий подбирать оптимальные параметры режима стерилизации в автоматическом режиме по заданным критериям (с использованием симплекс-метода оптимизации) для минимального по фактической летальности и энергозатратам процесса стерилизации.

На основании полученного в программе PRSC процесса, обеспечивающего условие $L_T^Z \geq F_T^Z$, согласно инструкции проводят не менее пяти автоклавоварок, при этом количество контрольных банок должно быть не менее трех в каждом опыте. Для расчетов принимают результаты тех пяти измерений, где зафиксированы наименьшие значения величины фактической летальности, причем учитывают результаты прогрева только одной банки из каждого опыта. Результаты считают достоверными, если величина L_T^Z каждого опыта отличается от среднего арифметического значения пяти опытов $L_T^Z_{ср.}$ не более, чем на 1 усл. мин. (Инструкция, 1996). На основании полученного режима проводятся его лабораторное испытание, а также производственная проверка.

Поиск параметров моделей тепловых процессов, проходящих в автоклаве и в банке с продуктом, осуществляется с помощью программ "Преобразование данных трендов в структурированный численный вид" (Власов и др., 2012а) и "Построение графиков по данным в формате .ods и моделирование объекта" (Власов и др., 2012b). В перспективе исследований планируется разработка единой специализированной программы, осуществляющей конвертирование данных формата файлов комплекса Etlab, подбор параметров моделей тепловых процессов, проходящих в автоклаве и банке с продуктом, а также формирование отчета по пяти автоклавоваркам с

фактическим стерилизующим эффектом, соответствующим требованиям инструкции по разработке режимов стерилизации.

Тестирование программы PRSC осуществлялось для режима стерилизации, утвержденного с фактическим стерилизующим эффектом 7,4 усл. мин. при требуемом значении 5,5 усл. мин., т.е. с запасом 35 %. Модель тепловых процессов, проходящих в консервной банке, была получена с максимальным отклонением по температуре на начальном участке 2 °С, и при температуре выше 100 °С отклонение не превысило 1 °С (рис. 3). Расхождение графиков модели температуры в банке с продуктом и эксперимента на этапе охлаждения незначительно сказывается на величине фактического стерилизующего эффекта. Модель тепловых процессов, проходящих в автоклаве, также была признана адекватной. На основании проведенной оптимизации процесса стерилизации программой PRSC подобран режим стерилизации, идентичный утвержденному для конкретного вида консервов с фактическим стерилизующим эффектом 7,39 усл. мин.

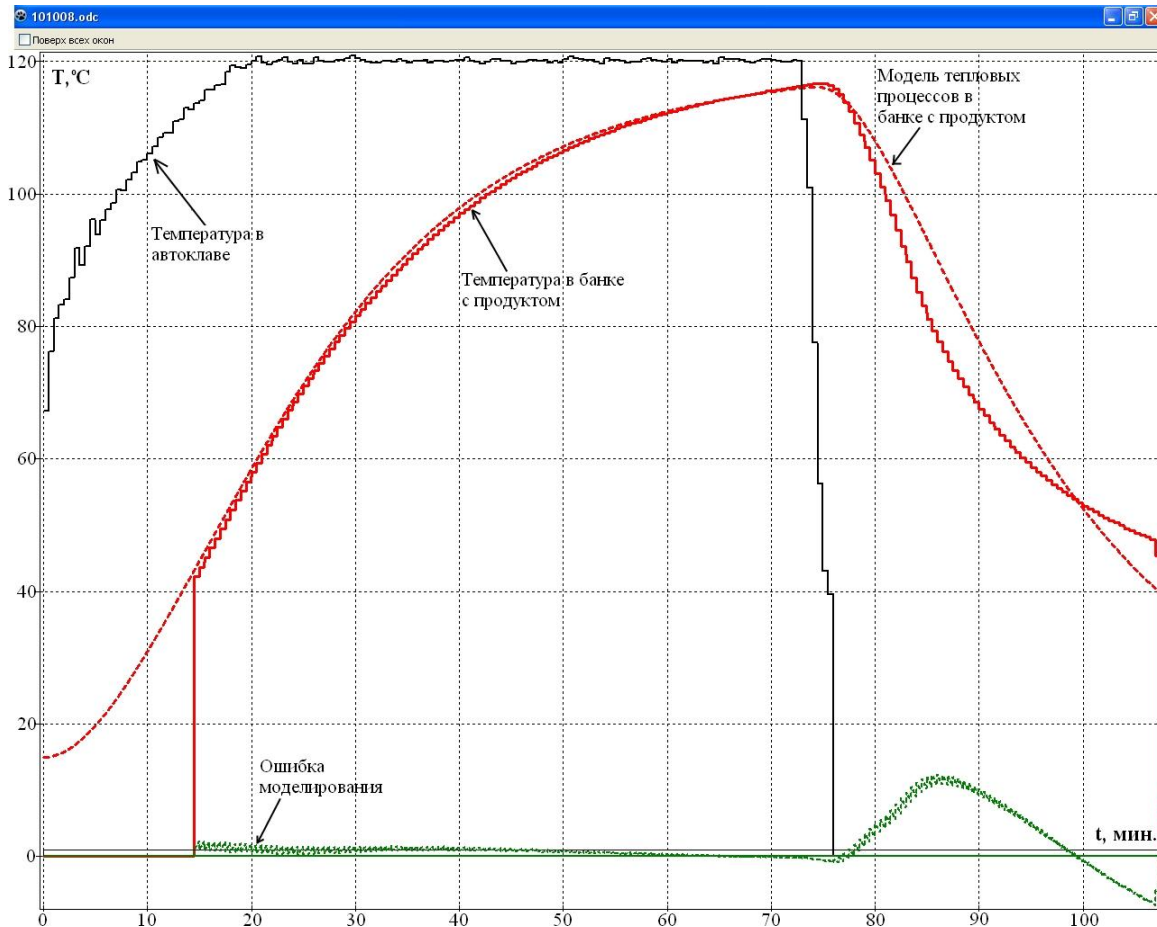


Рис. 3. Внешний вид окна "Графики процесса" программы "Построение графиков по данным в формате .odc и моделирование объекта"

4. Заключение

Разработка режимов стерилизации консервов с использованием средств вычислительной техники позволяет получать энергоэффективные режимы стерилизации консервов. При использовании программного средства PRSC, разработанного сотрудниками кафедры АиВТ МГТУ, возможно сократить количество пробных варок при подборе режима стерилизации путем замены реальных процессов на результаты численного моделирования. Тестирование программы с подбором режима стерилизации показало, что программа может использоваться для разработки режимов стерилизации консервов. В настоящее время планируется провести разработку нового режима стерилизации, оптимизированного по критерию минимальных энергозатрат, с помощью программы PRSC.

Литература

- Abakarov A., Nunez M.** Thermal food processing optimization: Algorithms and software. *Journal of Food Engineering*, doi: 10.1016/j.foodeng.2012.02.013, 2012.
- Абакаров А.Ш., Филиппович В.П.** Диалоговая система для нахождения переменных режимов стерилизации консервов. *Фундаментальные основы и передовые технологии в пищевой и перерабатывающей промышленности. Сб. науч. трудов 6-ой конф. молодых ученых и специалистов институтов Отделения хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Видное*, с. 8-11, 2012.
- Власов А.В.** Повышение эффективности стерилизации консервов паром в автоклавах. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мурманск*, 20 с., 2010.
- Власов А.В., Власова А.Р., Кайченев А.В.** Построение графиков по данным в формате .odc и моделирование объекта. Свид-во об офиц. рег. прог. для ЭВМ 2012615577 Рос. Федерация; правообладатель ФГБОУ ВПО Мурманский гос. техн. ун-т. № 2012613298; поступ. 24.04.2012; зарег. 20.06.2012б.
- Власов А.В., Власова А.Р., Кайченев А.В.** Преобразование архивных данных трендов 3S CodeSys в структурированный численный вид. Свид-во об офиц. рег. прог. для ЭВМ 2012615578 Рос. Федерация; правообладатель ФГБОУ ВПО Мурманский гос. техн. ун-т. № 2012613297; поступ. 24.04.2012; зарег. 20.06.2012а.
- Инструкция по разработке режимов стерилизации консервов из рыбы и морепродуктов. *Утв. Ком. Рос. Федерации по рыболовству. СПб., Гипрорыбфлот*, 42 с., 1996.
- Кайченев А.В., Власов А.В., Власова А.Р. и др.** Сопоставление модернизированного и традиционного способов стерилизации консервов. *Вестник МГТУ*, т. 16, № 3, с. 560-565, 2013.
- Кайченев А.В., Гроховский В.А., Власов А.В. и др.** Исследование модернизированного способа стерилизации консервов из гидробионтов. *Фундаментальные основы и передовые технологии в пищевой и перерабатывающей промышленности. Сб. науч. трудов 6-ой конф. молодых ученых и специалистов институтов Отделения хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Видное*, с. 115-119, 2012а.
- Кайченев А.В., Маслов А.А., Власов А.В. и др.** Оптимизация процесса стерилизации консервов в водной среде в автоклаве АВК-30М. *Вестник МГТУ*, т. 15, № 1, с. 49-53, 2012б.
- Маслов А.А., Власов А.В., Кайченев А.В. и др.** Совершенствование стерилизационной установки на базе модернизированного медицинского стерилизатора ВК-30. *Вестник МГТУ*, т. 12, № 2, с. 263-267, 2009.

References

- Abakarov A., Nunez M.** Thermal food processing optimization: Algorithms and software. *Journal of Food Engineering*, doi: 10.1016/j.foodeng.2012.02.013, 2012.
- Abakarov A.Sh., Filippovich V.P.** Dialogovaya sistema dlya nahozhdeniya variabelnykh rezhimov sterilizatsii konservov [Dialog system for finding sterilization's VRT profiles for the canned food]. *Fundamentalnye osnovy i peredovyye tehnologii v pischevoy i pererabatyivayushey promyishlennosti. Sb. nauch. trudov 6-oy konf. molodykh uchennykh i spetsialistov institutov Otdeleniya hraneniya i pererabotki selskokozyaystvennoy produktsii, Vidnoe*, p. 8-11, 2012.
- Vlasov A.V.** Povyishenie effektivnosti sterilizatsii konservov parom v avtoklavah [Increase of efficiency of the steam sterilization of canned food in autoclaves]. *Avtoref. dis. kand. tehn. nauk. Murmansk*, 20 p., 2010.
- Vlasov A.V., Vlasova A.R., Kaychenov A.V.** Postroenie grafikov po dannym v формате .odc i modelirovanie ob'ekta [Plotting the trends according to format .odc and object modeling]. *Svid-vo ob ofits. reg. prog. dlya EVM 2012615577 Ros. Federatsiya; правоobladatel FGBOU VPO Murmanskii gos. tehn. un-t. N 2012613298; postup. 24.04.2012; zareg. 20.06.2012b.*
- Vlasov A.V., Vlasova A.R., Kaychenov A.V.** Preobrazovanie arhivnykh dannykh trendov 3S CodeSys v strukturirovannyiy chislennyiy vid [Converting data trends 3S CodeSys in structured numerical form]. *Svid-vo ob ofits. reg. prog. dlya EVM 2012615578 Ros. Federatsiya; правоobladatel FGBOU VPO Murmanskii gos. tehn. un-t. N 2012613297; postup. 24.04.2012; zareg. 20.06.2012a.*
- Instruktsiya po razrabotke rezhimov sterilizatsii konservov iz ryiby i moreproduktov [Instructions for developing sterilization regimes of canned fish and seafood]. *Utv. Kom. Ros. Federatsii po ryibolovstvu. SPb., Giprorybflot*, 42 p., 1996.

- Kaychenov A.V., Vlasov A.V., Vlasova A.R. i dr.** Sopotavlenie modernizirovannogo i traditsionnogo sposobov sterilizatsii konservov [Comparison of modern and traditional canned food sterilization methods]. Vestnik MGTU, v. 16, N 3, p. 560-565, 2013.
- Kaychenov A.V., Grohovskiy V.A., Vlasov A.V. i dr.** Issledovanie modernizirovannogo sposoba sterilizatsii konservov iz gidrobiontov [Research of the modern sterilization method of the canned food made of hydrobionts]. Fundamentalnye osnovy i peredovyye tehnologii v pischevoy i pererabatyivayushey promyshlennosti. Sb. nauch. trudov 6-oy konf. molodyih uchenyih i spetsialistov institutov Otdeleniya hraneniya i pererabotki selskohozyaystvennoy produktsii, Vidnoe, p. 115-119, 2012a.
- Kaychenov A.V., Maslov A.A., Vlasov A.V. i dr.** Optimizatsiya protsessa sterilizatsii konservov v vodnoy srede v avtoklave AVK-30M [Optimization of the sterilization process of canned food in water in the AVK-30M autoclave]. Vestnik MGTU, v. 15, N 1, p. 49-53, 2012b.
- Maslov A.A., Vlasov A.V., Kaychenov A.V. i dr.** Sovershenstvovanie sterilizacionnoy ustanovki na baze modernizirovannogo medicinskogo sterilizatora VK-30 [Upgrading of a sterilizer on the basis of the medical sterilizer AVK-30]. Vestnik MGTU, v. 12, № 2, p. 263-267, 2009.

Информация об авторах

Кайченко Александр Вячеславович – Политехнический институт МГТУ, кафедра автоматике и вычислительной техники, канд. техн. наук, стар. науч. сотрудник, e-mail: ican2005@yandex.ru

Kaychenov A.V. – Polytechnic Institute of MSTU, Department of Automatics and Computer Engineering, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher, e-mail: ican2005@yandex.ru

Власов Александр Валентинович – Политехнический институт МГТУ, кафедра автоматике и вычислительной техники, канд. техн. наук, стар. науч. сотрудник, e-mail: ican2005@yandex.ru

Vlasov A.V. – Polytechnic Institute of MSTU, Department of Automatics and Computer Engineering, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher, e-mail: ican2005@yandex.ru

Власова Анастасия Ряхимжановна – Политехнический институт МГТУ, кафедра автоматике и вычислительной техники, науч. сотрудник, e-mail: ican2005@yandex.ru

Vlasova A.R. – Polytechnic Institute of MSTU, Department of Automatic Equipment and Computer Science, Researcher, e-mail: ican2005@yandex.ru

Маслов Алексей Алексеевич – Политехнический институт МГТУ, профессор кафедры автоматике и вычислительной техники, канд. техн. наук, e-mail: maslova@mstu.edu.ru

Maslov A.A. – Polytechnic Institute of MSTU, Department of Automatics and Computer Engineering, Cand. of Tech. Sci., Professor, e-mail: maslova@mstu.edu.ru

Селяков Илья Юрьевич – Политехнический институт МГТУ, кафедра автоматике и вычислительной техники, мл. науч. сотрудник, e-mail: selyakov@list.ru

Selyakov I.Yu. – Polytechnic Institute of MSTU, Department of Automatics and Computer Engineering, Junior Researcher, e-mail: selyakov@list.ru