

Программный комплекс для моделирования системы управления процессом пастеризации рыбных консервов

А.А. Жук¹, О.Л. Ахремчик^{1,2}

¹Российский биотехнологический университет, Москва

²Тверской государственной технической университет, Тверь

Аннотация: В ходе выпуска деликатесных рыбных консервов система управления должна обеспечивать щадящий режим термообработки со снижением степени температурного воздействия на продукт. Изменение режимов требует перенастройки вида и параметров регуляторов температуры в автоклаве, осуществляемой на основе результатов моделирования обработки. Программный комплекс для моделирования объекта и системы управления при пастеризации предусматривает расчет степени стерилизующего эффекта. Комплекс содержит системное и прикладное программное обеспечение. Прикладные модули реализуют функции графического интерфейса, виртуального регулятора, численного моделирования изменения температуры продукта и передачи данных. Виртуальный контроллер позволяет выбирать регуляторы: позиционный, пропорционально-интегрально-дифференциальный, состояния. Новизна модели заключается в отображении и возможности изменения как параметров регулятора, так и коэффициентов желаемого полинома с учетом знака производной температуры при нагреве и охлаждении. Практической ценностью работы является сокращение времени на перенастройку системы управления автоклавом, обеспечение снижения степени температурного воздействия при достижении заданного стерилизующего эффекта за счет подбора вида и параметров законов регулирования температуры.

Ключевые слова: программный комплекс, моделирование, система управления, пастеризация, рыбные консервы, регулятор, температура.

Введение

В соответствии со стратегией развития рыбопромыслового и рыбообрабатывающего оборудования, необходимо применять технологии и оборудование, обеспечивающие снижение потерь и выпуск качественной продукции. Задачи сокращения расхода энергоресурсов и снижения степени температурного воздействия при тепловой обработке в автоклаве являются ключевыми при модернизации и создании систем автоматизации процессами тепловой обработки в пищевой промышленности [1]. Вопросы повышения эффективности термообработки без снижения стерилизующего эффекта (коэффициента F) определяют разработку и апробацию режимов стерилизации с использованием комплекса моделей оборудования, продукта

и контуров регулирования [2]. Новизна и необходимость разработки моделей процессов пастеризации и систем управления ими определяется тем, что в последнее десятилетие выдвигаются научно-обоснованные предложения по продвижению на продовольственный рынок новых видов консервов повышенного качества [3]. Локализация производства деликатесных рыбных консервов (например, из филе лосося с экзотическими фруктами) на судах при температурах ниже 100°C (пастеризации) позволяет обеспечить выпуск продуктов с более выраженными вкусовыми свойствами при условии хранения при пониженных температурах [4]. Безопасность пастеризованных консервов является основным показателем при управлении производством. Поэтому постоянно совершенствуются методы расчета режимов термической стерилизации, например основанные на парадигме определения фактической летальности наименее прогреваемой зоны при конвективном прогреве пищевых систем в упаковках [5].

Производство деликатесных рыбных продуктов требует перенастройки локальных регуляторов систем управления автоклавами с выпуска стерилизованных рыбных консервов (основной продукт) на пастеризованные (продукт под заказ или при наличии сырья требуемого вида).

Целью работы является снижение степени температурного воздействия на продукт за счет перенастройки локальных систем регулирования при переходе с производства стерилизованных к пастеризованным рыбным консервам, выпускаемым на судах флота рыбной промышленности.

Задачи, решаемые в ходе исследований:

- разработка программного комплекса, обеспечивающего поддержку процесса принятия решений по изменению закона и параметров регулятора температуры среды в автоклаве на основе моделирования работы системы управления процессом пастеризации деликатесных рыбных консервов с учётом вида продукта, типа консервной тары, ограничений на энергоресурсы;

- апробация комплекса и получение динамических моделей контуров управления для новых режимов работы судового автоклава с определением вида и параметров моделей объекта и системы управления на примере изготовления продуктов с применением щадящих температурных режимов.

Предпосылки разработки и применения программного комплекса

Перенастройка на судах существующих систем управления автоклавами с режима стерилизации на режим пастеризации требует знания передаточных функций объекта по нескольким каналам и приводит к многочисленным итерациям с возможным перерегулированием (превышением степени температурного воздействия) или выпуском продукта при недостаточном значении стерилизационного эффекта. Ориентация на стерилизацию консервов в промышленных условиях определяет направленность методики моделирования системы управления на формулу термообработки «нагрев-выдержка-охлаждение» с заданием регулятору температуры значения около 120°C .

При пастеризации осуществляется снижение значения задания локальному регулятору ниже 100°C , определяющее как повышение качества, так и снижение затрат энергии на термообработку. Новизной авторского подхода является компьютерное моделирование работы систем автоматического регулирования температуры в стерилизационной камере при разных видах и параметрах регуляторов. Получаемые в ходе моделирования результаты являются начальными настройками с последующей донастройкой регуляторов при смене ассортимента или режимов обработки. Исследователями дополняются и параметризуются для режима пастеризации деликатесных продуктов полученные ранее для условий стерилизации передаточные функции судового автоклава по каналу «температура среды в камере-температура продукта» [6]. Поиск рациональных законов регулирования и их параметров производится с

одновременной заменой импортных программно-технических средств автоматизации на отечественные [7]. Выбор отечественных приборов и программного обеспечения предусматривает настройку и конфигурацию общепромышленного регулятора на управление автоклавами и пастеризаторами [8]. Получение положительного эффекта при замене сопряжено с правильными идентификацией объектов и выбором законом и параметров регулирования при переходе с режима стерилизации к пастеризации и наоборот.

Практическая ценность работы заключается в снижении числа автоклавоварок с нерационально подобранными настройками локальных регуляторов при перенастройке системы управления судового автоклава в случае изменения ассортимента и режимов обработки продукции. Снижение обеспечивается за счет предварительного моделирования изменения температуры продукта при разных законах регулирования и начальных настройках. Использование регуляторов с заранее подобранными коэффициентами в модели синтеза управления позволяет удовлетворять базовым ограничениям задач оптимизации производства пищевой рыбной продукции [9]. Ясно, что оптимальных настроек локальных регуляторов получить не удастся и поэтому в исследовательской практике используются методы и алгоритмы определения начальных значений и интервалов изменения параметров закона регулирования [10]. Подобные методы предусматривают компьютерное моделирование как на этапе разработки, так и при эксплуатации систем управления [11]. Создаваемый программный комплекс предназначен для компьютерного моделирования процессов изменения температур в камере автоклава и в продукте.

Традиционно моделируются процессы нагрева, охлаждения и изменения давления [12]. Полученные в ходе моделирования переходные

характеристики являются основой для подбора закона регулирования с последующей параметризацией.

Методика получения передаточных функций предусматривает: определение математической модели обратной связи, проведение физического эксперимента и построение модели объекта с расчетом коэффициента достоверности аппроксимации, моделирование разомкнутого контура, оценка точности идентификации [13]. После расчета передаточных функций производится моделирование замкнутого контура в разных режимах

Состав программного комплекса

Программное обеспечение комплекса состоит из системной и прикладной частей (рис. 1). С точки зрения системного обеспечения комплекс является кроссплатформенным, хотя при апробации применялись в основном операционные системы (ОС) Windows разных модификаций. Функционирование прикладной части при вводе и передаче данных требует установки программной платформы, зависящей от типа ОС (например, NET Framework). Прикладные модули имитируют работу регулятора, в качестве которого применяется общепромышленный программируемый логический контроллер (ПЛК). В комплексе работа ПЛК имитируется виртуальным прибором, который представляет собой код на языке ST (Structured Text), описывающий алгоритм управления процессом пастеризации. Выбор языка ST определен для обеспечения преемственности и совместимости с ранее разработанными системами управления [6].

Второй программный модуль комплекса предназначен для решения систем уравнений, описывающих нагрев и охлаждение продукта в таре. С учетом того, что размер тары, вид продукта и заливок могут различаться, требуется несколько вариантов начальных условий для каждого ассортимента и режима обработки (например, банка №2, филе лосося, масляная заливка с фруктами).

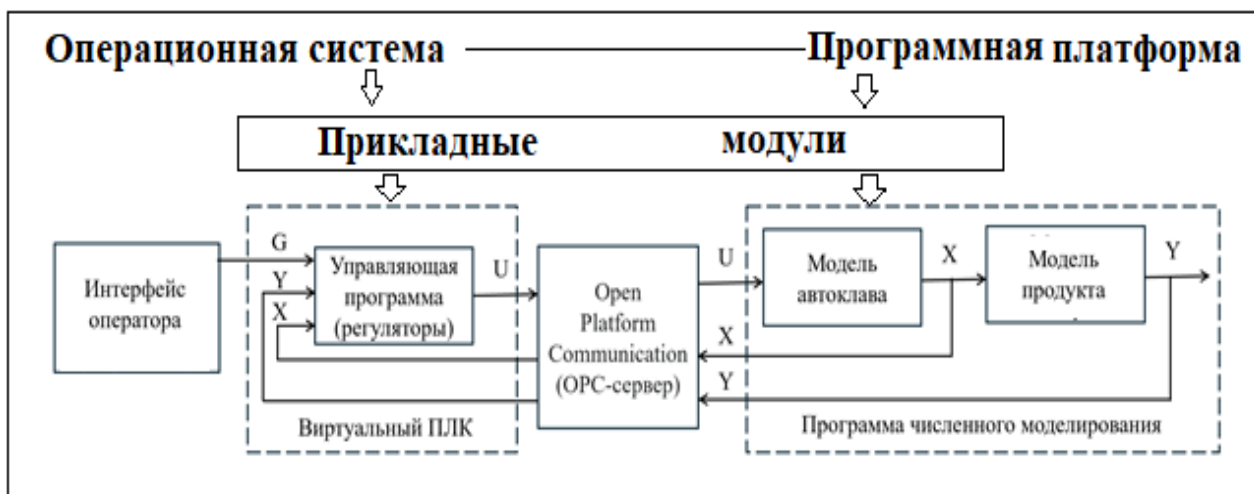


Рис. 1. – Структура программного комплекса

Графический интерфейс оператора предназначен для ввода и отображения параметров системы управления, в том числе архивных. В виртуальном ПЛК хранится управляющая программа регулятора, реализующая закон регулирования, снижающий степень температурного воздействия на продукт. Программа численного моделирования второго модуля позволяет получить решения дифференциальных уравнений, используемых для описания изменений температуры. OPC (Open Platform Communication)-сервер используется для обмена данными между виртуальным ПЛК и моделирующей программой, а также может применяться для подключения реальных регуляторов к компьютерной реализации моделей автоклава и продукта.

В программе численного моделирования задаются параметры моделей объекта управления в виде коэффициентов дифференциальных уравнений, либо передаточных функций, с указанием начальных условий для выбранного режима обработки и ассортимента консервов.

Управляющая программа реализует алгоритмы: позиционного регулирования (реле), пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора и регулятора состояния (Р.С.) (рис. 2).

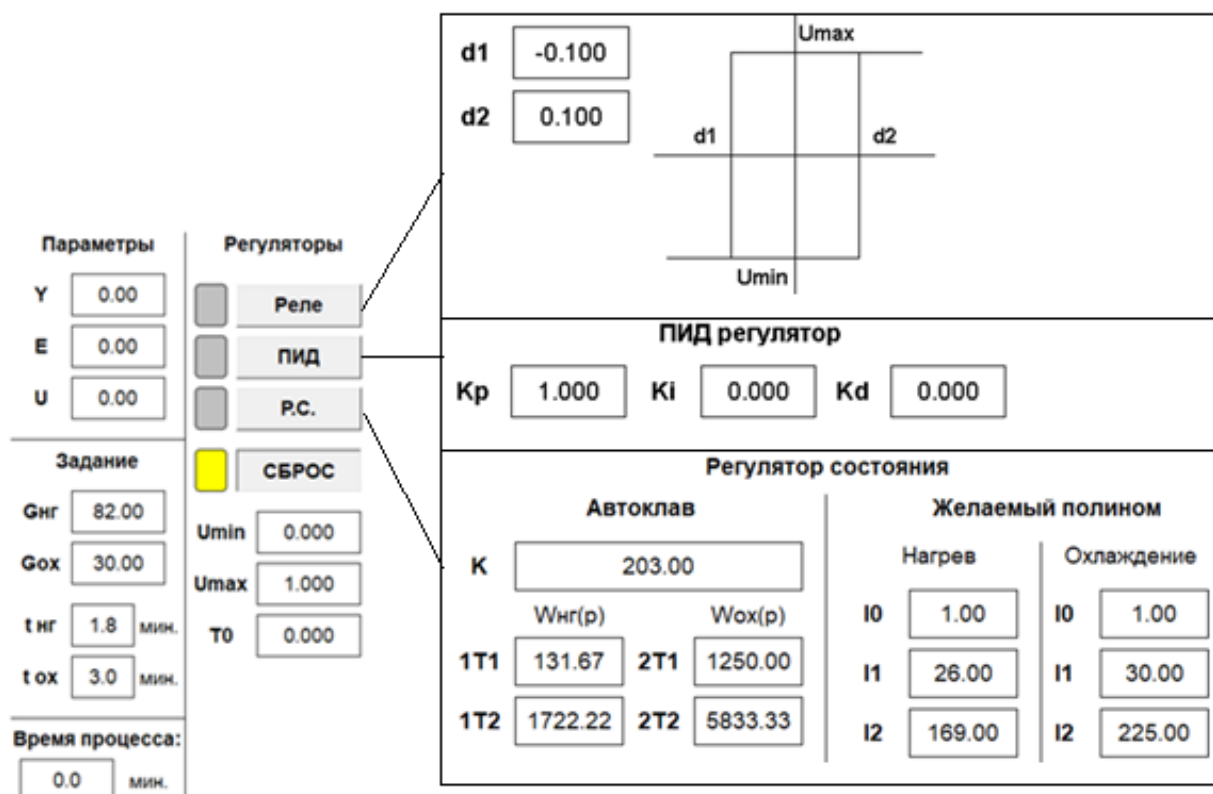


Рис. 2. – Выбор закона и параметров регуляторов в модуле графического интерфейса

В графическом интерфейсе комплекса имеются кнопки «Реле», «ПИД» и «P.C.» для задания закона регулирования. Свечение цветного индикатора рядом с кнопкой отражает тип используемого закона регулирования. Кнопка «СБРОС» предназначена для остановки процесса моделирования и повторной инициализации. В ходе работы в окне интерфейса отображаются параметры: Y – температура продукта внутри тары, °C; E – разность заданного и текущего значений температуры продукта, °C; U – сигнал управления, формируемый цифровым регулятором; $G_{нг}$ – конечная температура продукта на этапе нагрева, °C; $G_{ох}$ – конечная температура продукта на этапе охлаждения, °C; $t_{нг}$ – длительность нагрева, мин.; $t_{ох}$ – длительность охлаждения, мин.; время процесса – длительность процесса пастеризации, мин.; U_{min} – минимальное значение управляющего сигнала;

U_{\max} – максимальное значение управляющего сигнала; T_0 – шаг квантования при моделировании, с.

Наблюдение за конечной температурой продукта на этапе нагрева позволяет выбирать желаемые настройки регулятора, руководствуясь требованиями щадящего режима с одной стороны и достижения стерилизующего эффекта с другой.

В ходе задания позиционного закона регулирования рассчитываются и устанавливаются нижняя d_1 и верхняя d_2 - границы зоны нечувствительности, определяющие амплитуду возможных колебаний температуры при релейном регулировании. Функция реле в программе имитируется с использованием оператора условия. В случае выбора ПИД закона по классической теории управления задаются коэффициенты пропорциональной (K_p), интегральной (K_i) и дифференциальной (K_d) составляющих. Расчёт управляющего воздействия выполняется согласно рекуррентной формуле цифрового ПИД-регулятора.

Форма настройки регулятора состояния предусматривает ввод и отображение параметров передаточных функций автоклава (коэффициента усиления K , постоянных времени $1T_1, 1T_2, 2T_1, 2T_2$) при нагреве ($W_{\text{нг}}$) и охлаждении ($W_{\text{ох}}$), а также коэффициентов желаемого полинома (I_0, I_1, I_2) дифференциальных уравнений, описывающих изменение температуры.

Модуль для численного моделирования изменения температуры

В модуле численного моделирования реализовано решение задачи Коши для дифференциальных уравнений разного порядка, описывающих динамику регуляторов температуры с разным законом регулирования.

При применении регулятора состояния предварительно выполняется идентификация параметров математической модели камеры автоклава, в качестве которой рассматривается инерционное звено второго порядка [5]:

$$W(p) = \frac{K}{T_2 p^2 + T_1 p + 1},$$

где K – коэффициент передачи; T_2 и T_1 – постоянные времени, с; p – оператор Лапласа.

Для судового промышленного автоклава типа «ASCAMAT» в ходе апробации и верификации работы программного комплекса определен набор передаточных функций для разных видов продукта при нагреве и охлаждении на основе звена второго порядка, которые можно использовать для пастеризации деликатесных консервов «Филе лосося с экзотическими фруктами»:

$$W_{\text{нг}}(p) = \frac{203}{1722,22p^2 + 131,67p + 1}, \quad W_{\text{ох}}(p) = \frac{203}{5833,33p^2 + 1250p + 1}.$$

Желаемый полином в модели пастеризации имеет второй порядок:

$$\gamma = I2 \cdot p^2 + I1 \cdot p + I0.$$

Коэффициенты желаемого полинома при нагреве и охлаждении консервов «Филе лосося с экзотическими фруктами» в процессе пастеризации:

$$\gamma_{\text{нг}} = 169 \cdot p^2 + 26 \cdot p + 1, \quad \gamma_{\text{ох}} = 225 \cdot p^2 + 30 \cdot p + 1.$$

На основе получаемых при идентификации камеры технологического аппарата моделей выполняется расчет регулятора для получения требуемых показателей качества регулирования с ограничением на перерегулирование при обеспечении требований снижения степени температурного воздействия.

На рис. 3 представлена схема модели изменения температуры продукта при учете в математической модели влияния запаздывания (τ – время запаздывания; X – заданное значение; Y_0 – заданное значение температуры продукта; s – обозначение оператора Лапласа в программе моделирования).

Новизной является использование в программном комплексе двойного аналогового элемента, реагирующего на изменение значений постоянной времени в зависимости от знака производной температуры (рис. 4).

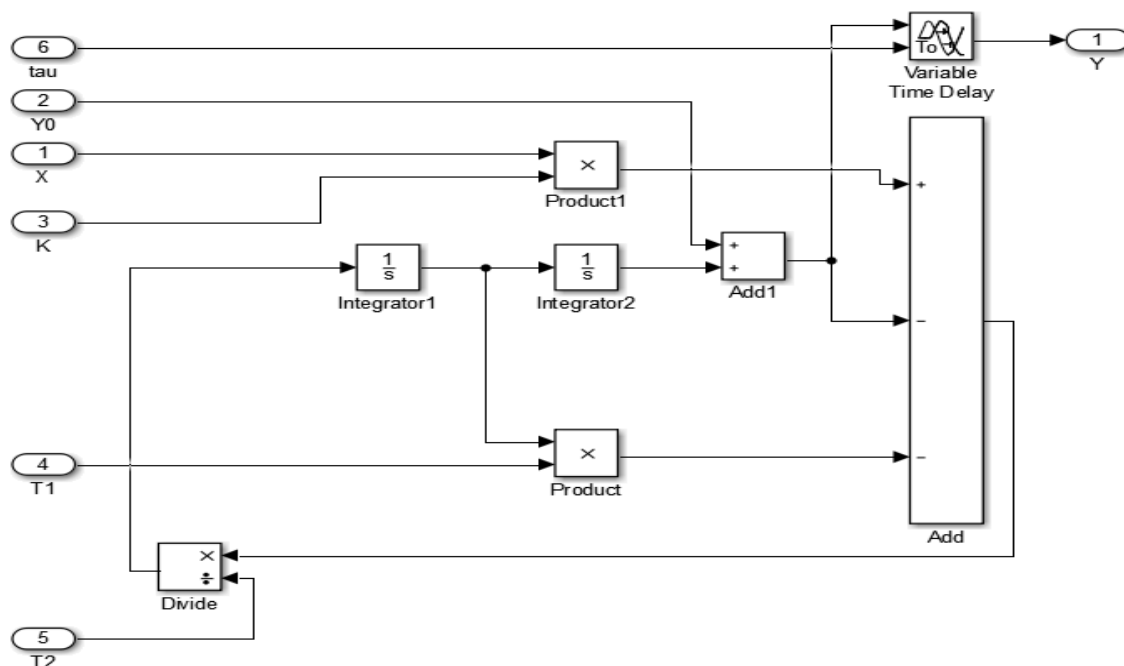


Рис.3. – Представление модели камеры автоклава

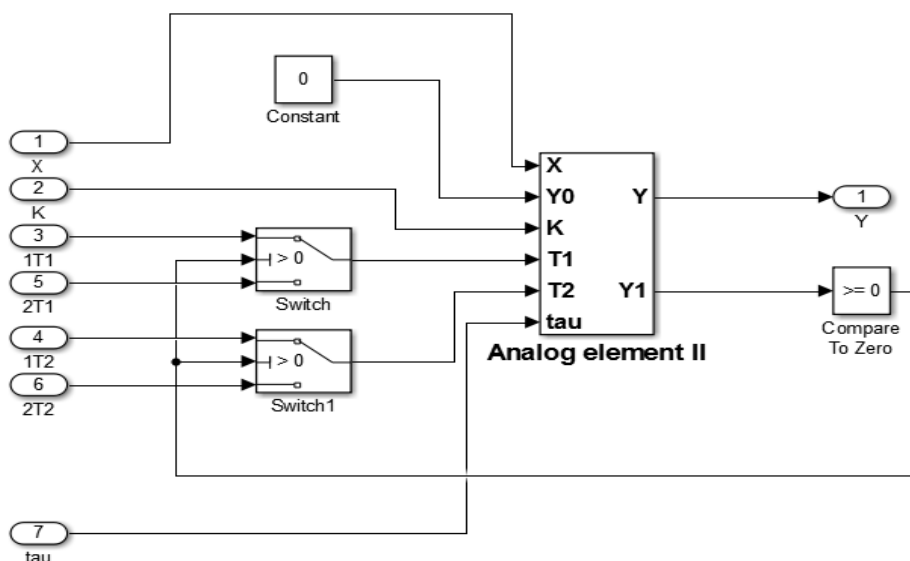


Рис. 4. – Использование в программном комплексе
дополнительного аналого элемента

Пример программы моделирования изменения температуры продукта с расчетом степени стерилизующего эффекта (F эффект) для одного из видов консервов представлен на рис. 5. В случае не достижения значения стерилизующего эффекта заданного порога проводится изменение параметров, а возможно и закона регулирования.

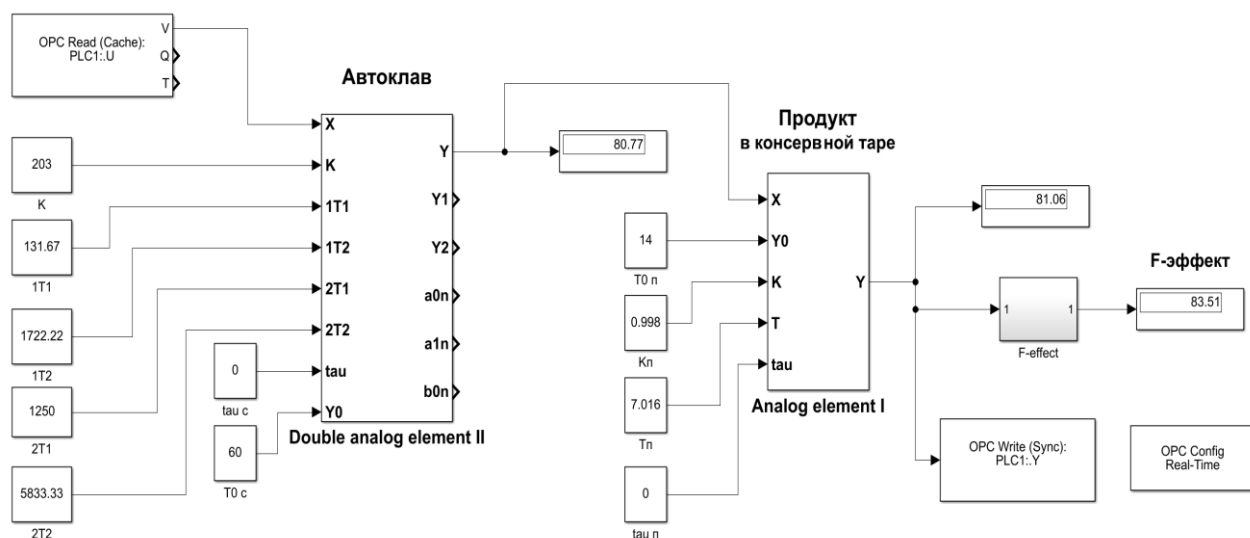


Рис. 5. – Вид программы численного моделирования

Заключение

Использование программных комплексов для моделирования изменения температур при щадящих режимах термообработки пищевых продуктов позволяет осуществлять выбор законов и параметров регулирования температуры в камере автоклава как предварительно, так и в ходе технологического цикла. Вариация ассортимента продукции в судовых условиях, определяемая изменением вида сырья при вылове или заказом на деликатесную продукцию сопровождается перенастройкой регуляторов температуры в автоклаве с режима стерилизации на режим пастеризации. Разработанный программный комплекс и полученные при апробации методика и примеры его использования показали возможность быстрого перехода к энергоэффективной термообработке продукта в щадящем температурном режиме с заданной степенью стерилизующего эффекта.

Результаты моделирования с использованием программного комплекса применяются в ходе выбора отечественных регуляторов при замене импортных программно-технических средств с целью определения функциональных требований к приборному базису. Использование программного комплекса в судовых условиях позволит осуществлять

перенастройку регуляторов температуры на новый ассортимент продукции с использованием щадящих температурных режимов обработки и достижении требуемой степени стерилизующего эффекта. Продолжение работ направлено на использование в программном комплексе вместо импортного программного обеспечения (как системного, так и прикладного) программ со свободной лицензией и отечественных сред моделирования.

Литература

1. Мокрушин С.А., Охапкин С.И., Хорошавин В.С. Исследование процесса стерилизации консервной продукции с целью дальнейшей автоматизации // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2015. №4. С. 316-318.

2. Маслов А.А., Столянов А.В., Кайченев А.В., Куранова Л.К. Предварительный подбор режима стерилизации консервов «Скумбрия атлантическая натуральная с добавлением масла» на основе разработанных математических моделей процесса // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2016. №4. С. 861-868. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-4-861-868.

3. Гроховский В.А., Куранова Л.К., Волченко В.И., Петрова К.Н. Пастеризованные консервы из трески и лосося с добавлением масла с оптимизированным композиционным составом // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. 2018. №2. С. 114-125. DOI: 10.24143/2073-5529-2018-2-114-125.

4. Демид А.В., Гроховский В.А., Куранова Л.К., Волченко В.И. Создание новых деликатесных пастеризованных рыбных консервов с экзотическими фруктами и оливковым маслом // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2018. №3. С. 460-470. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-3-460-470.

5. Сенкевич В.И. Научные основы режимов финишной стерилизации жидких консервируемых пищевых систем // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2021. №2 (48). С. 53-67. DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-2-53-67.

6. Жук А.А. Численный поиск параметров математических моделей пищевых продуктов из гидробионтов для процессов пастеризации // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. №2. С. 89-98. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-89-98.

7. Тараненко М.Е. Импортозамещение контроллерного оборудования систем управления кислородно-конвертерным производством стали на Новолипецком металлургическом комбинате с использованием отечественного оборудования // Инженерный вестник Дона. 2024. №2. – URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35__2y24_Taranenko.pdf_e480fe8ee5.pdf (дата обращения: 03.07.2024).

8. Система управления пастеризатором на основе температурного контроллера Delta DTV. – URL: deltronics.ru/articles/sistema-upravleniya-pasterizatorom-na-osnove-temperaturnogo-kontrollera-delta-dtv/?ysclid=ly4lmpqrwc764942009 (дата обращения: 03.07.2024).

9. Белякова А.Ю., Бузина Т.С., Иванько Я.М. Многокритериальная параметрическая оптимизация получения продовольственной продукции // Инженерный вестник Дона. 2024. №6. – URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_52N4y24_Belyakova_Buzina_Ivanyo.pdf_5ce6905b61.pdf (дата обращения 01.07.2024)

10. Жуков А.В. Методика вычисления интервальных значений коэффициентов передаточной функции систем автоматического управления // Инженерный вестник Дона. 2022. №12. – URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_29__12_Zhukov.pdf_4aedac6e67.pdf (дата обращения 01.07.2024)

11. Kamalakannan G.M., Rao M. Subba Development of a computer based process control system for an autoclave to cure polymer matrix composites // Proceedings of International conference on Instrumentation – 2004, Pune. – URL: researchgate.net/publication/258866902_DEVELOPMENT_OF_A_COMPUTER_BASED_PROCESS_CONTROL_SYSTEM_FOR_AN_AUTOCLAVE_TO_CURE_POLYMER_MATRIX_COMPOSITES (дата обращения 01.07.2024)

12. Preglej A., Karba R., Steiner I., Škrjanc I. Mathematical Model of an Autoclave // Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering, January 2011. Pp. 503-516. DOI: 10.5545/sv-jme.2010.182

13. Свитек А.С. Разработка алгоритма идентификации параметров моделей объектов на примере системы управления температурой // Инженерный вестник Дона. 2021. №8. – URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_1__8_Svitek_article.pdf_ed6820fd5e.pdf (дата обращения: 03.07.2024)

References

1. Mokrushin S.A., Ochapkin S.I., Horoshavin V.S. Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyyh proizvodstv». 2015. №4. Pp.316-318.

2. Maslov A.A., Stoljanov A.V., Kajchenov A.V., Kuranova L.K. Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2016. №4. Pp. 861-868. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-4-861-868.

3. Grohovskij V.A., Kuranova L.K., Volchenko V.I., Petrova K.N. Vestnik AGTU. Serija: Rybnoe hozjajstvo. 2018. №2. Pp. 114-125. DOI: 10.24143/2073-5529-2018-2-114-125.

4. Demid A.V., Grohovskij V.A., Kuranova L. K., Volchenko V.I. Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2018. №3. Pp. 460-470. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-3-460-470.

5. Senkevich V.I. Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv». 2021. №2 (48). Pp. 53-67. DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-2-53-67.

6. Zhuk A.A. Vestnik AGTU. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika. 2021. №2. Pp. 89-98. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-89-98.

7. Taranenko M.E. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. №2. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35__2y24_Taranenko.pdf_e480fe8ee5.pdf (Date accessed 03.07.2024)

8. Sistema upravlenija pasterizatorom na osnove temperaturnogo kontrollera Delta DTV [Delta DTV Temperature Controller Pasteurizer Control System]. URL: deltronics.ru/articles/sistema-upravleniya-pasterizatorom-na-osnove-temperaturnogo-kontrollera-delta-dtv/?ysclid=ly4lmpqpw764942009 (Date accessed 03.07.2024)

9. Beljakova A.Ju., Buzina T.S., Ivan'o Ja.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. №6. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_52N4y24_Belyakova_Buzina_Ivanyo.pdf_5ce6905b61.pdf (Date accessed 01.07.2024)

10. Zhukov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №12. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_29__12_Zhukov.pdf_4aedac6e67.pdf (Date accessed 01.07.2024)

11. Kamalakannan G.M., Rao M. Subba Proceedings of International conference on Instrumentation. 2004. Pune. URL: researchgate.net/publication/258866902_DEVELOPMENT_OF_A_COMPUTER_BASED_PROCESS_CONTROL_SYSTEM_FOR_AN_AUTOCLAVE_TO_CURE_POLYMER_MATRIX_COMPOSITES (Date accessed 01.07.2024)

12. Preglej A., Karba R., Steiner I., Škrjanc I. Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering, January 2011. Pp. 503-516. DOI: 10.5545/sv-jme.2010.182



13. Svitek A.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. №8. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_1__8_Svitek_article.pdf_ed6820fd5e.pdf (Date accessed 03.07.2024).

Дата поступления: 8.06.2024

Дата публикации: 18.07.2024