

Научная статья/Research Article

УДК 66-977

DOI: 10.36718/1819-4036-2022-6-162-170

**Алексей Александрович Королев<sup>1✉</sup>, Наталья Евгеньевна Посокина<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, Видное, Московская область, Россия

<sup>1</sup>process@vniitek.ru

<sup>2</sup>Labtech45@yandex.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССАХ СТЕРИЛИЗАЦИИ КОНСЕРВИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ

Финальной стадией разработки новых консервированных продуктов является термическая обработка. Ее проводят с целью инактивации микрофлоры, тем или иным способом попавшей в продукт. Этот процесс требует нахождения баланса между позитивным и отрицательным воздействием высоких температур на продукт. Позитивное воздействие заключается в инактивации микроорганизмов, присутствующих в пищевых продуктах и негативно влияющих на здоровье потребителя и безопасность продукции. Отрицательное воздействие выражается в снижении пищевой ценности, утрате неустойчивых к высоким температурам нутриентов (например, витаминов и др.). При исследовании динамик прогрева консервированных продуктов отмечается выраженная неравномерность тепловой обработки, длительность термического воздействия и высокие энергозатраты. Действующие в настоящий момент режимы термической обработки могут превышать нормативную летальность на 30–50 %, а порой и в несколько раз. Проведение большого количества прогревов продукции с целью поиска оптимального соотношения временного воздействия и температуры очень затратно. Наиболее целесообразным представляется использование расчетных методов и компьютерного моделирования процессов термической обработки с целью определения оптимального сочетания продолжительности температурного воздействия на продукт. Анализ приведенных литературных источников указывает на несколько направлений определения оптимизации режимов тепловой стерилизации пищевых продуктов (расчет по разнице значений наименее прогреваемой точки и температуры нагрева контейнеров, по значениям между расчетной и полученной летальностью, расчет режима с учетом данных таблиц Стумбо, расчет по показателям затраченной энергии). Проведение исследований по определению динамики нагревов в наименее прогреваемой зоне в различных пищевых системах на летальность и влияния закономерностей теплопроводности пищевых систем на характер теплообмена позволит в дальнейшем разработать метод прогнозирования и оптимизации процессов стерилизации.

**Ключевые слова:** стерилизация, летальность, математическое моделирование, термодинамика, наименее прогреваемая точка

**Для цитирования:** Королев А.А., Посокина Н.Е. Применение расчетных методов и компьютерного моделирования в процессах стерилизации консервированных продуктов // Вестник КрасГАУ. 2022. № 6. С. 162–170. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-6-162-170.

**Alexey Alexandrovich Korolev<sup>1✉</sup>, Natalya Evgenievna Posokina<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>All-Russian Research Institute of Canning Technology – a branch of the Federal Scientific Center for Food Systems named after V.M. Gorbатов RAS, Vidnoe, Moscow Region, Russia

<sup>1</sup>process@vniitek.ru

<sup>2</sup>Labtech45@yandex.ru

## APPLYING CALCULATION METHODS AND COMPUTER SIMULATION IN THE CANNED PRODUCTS STERILIZATION PROCESSES

*The final stage in the development of new canned foods is heat treatment. It is carried out in order to inactivate the microflora that somehow got into the product. This process requires finding a balance between the positive and negative effects of high temperatures on the product. The positive effect consists in the inactivation of microorganisms present in food products and negatively affecting consumer health and product safety. The negative impact is expressed in a decrease in nutritional value, the loss of nutrients that are unstable to high temperatures (for example, vitamins, etc.). In the study of the dynamics of heating of canned products, a pronounced unevenness of heat treatment, the duration of thermal exposure and high energy costs are noted. The current heat treatment modes can exceed the standard lethality by 30–50 %, and sometimes several times. Carrying out a large number of product warm-ups in order to find the optimal ratio of temporary exposure and temperature is very expensive. The most appropriate is the use of calculation methods and computer simulation of heat treatment processes in order to determine the optimal combination of the duration of the temperature effect on the product. The analysis of the given literary sources indicates several directions for determining the optimization of the modes of thermal sterilization of food products (calculation by the difference in the values of the least heated point and the heating temperature of the containers, by the values between the calculated and received lethality, calculation of the mode taking into account the data of the Stumbo tables, calculation by indicators of the expended energy). Conducting research to determine the dynamics of heating in the least heated zone in various food systems on lethality and the influence of the patterns of thermal conductivity of food systems on the nature of heat transfer will further develop a method for predicting and optimizing sterilization processes.*

**Keywords:** sterilization, lethality, mathematical modeling, thermodynamics, least heated point

**For citation:** Korolev A.A., Posokina N.E. Applying calculation methods and computer simulation in the canned products sterilization processes // Bulliten KrasSAU. 2022;(6): 162–170. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2022-6-162-170.

**Введение.** Режимы термической стерилизации продукции разрабатываются с таким условием, чтобы предотвратить в них развитие остаточной микрофлоры (микроорганизмов, сохранивших свою жизнеспособность) [1, 2]. Остаточная микрофлора может размножаться при отступлении от заданных режимов и благоприятных условиях, при этом происходят значительные биохимические и органолептические изменения продукта, которые проходят быстро и заметны в течение первых 10–15 суток после изготовления [3]. Наблюдается интенсивный рост остаточной микрофлоры, в некоторых случаях газообразование, которое приводит к изменению формы банки или «микробиологическому бомбажу». Остаточная микрофлора, которая в основном представлена термоустойчивыми спорообразующими аэробными и анаэробными микроорганизмами, может вызвать порчу консервов и представлять серьезную опасность для здоровья потребителя [1, 2].

Неспорообразующая нетермоустойчивая микрофлора в стерилизованных консервах обычно отсутствует. Присутствие этих микроор-

ганизмов в консервах может быть связано с нарушением технологического процесса или герметичности упаковки [4]. В связи с этим при расчете режимов термической обработки продукции чрезвычайно важным является определение такого сочетания временного фактора и температуры, которое позволяет инактивировать весь спектр микроорганизмов, контаминирующих продукт, и при этом максимально сохранить биологическую ценность сырья.

Для оценки эффективности процесса термической обработки используется термин «летальность процесса», или «стерилизующий эффект» (F-эффект) [5–8]. Данный показатель рассчитывается исходя из нескольких основных факторов – физико-химических свойств продукта, кинетики гибели микроорганизмов, начальной обсемененности продукта и др. Требуемая летальность процесса (или F- нормативное) выражается в условных минутах – времени, в течение которого количество микроорганизмов в продукте снижается до заданного уровня или полностью уничтожается. Летальность может достигаться как при основном времени стерили-

зации, так и после него. Например, в работе М. Этзеля отмечено, что большая часть летальности, достигаемой в процессе домашнего консервирования, происходит во время этапа охлаждения, незначительные различия в этапе нагрева процесса не влияют на общую летальность процесса. При стерилизации яблочного пюре, томатного сока и клюквы в стеклянных банках наблюдались минимальные различия в скорости нагрева и в летальности при нагревании, но различий в летальности при охлаждении нет [9].

Применение моделей процесса стерилизации, основанных на расчете летальности, теплопроводности, вязкости пищевых продуктов, позволит выбрать оптимальные технологические параметры и спрогнозировать изменение качественных показателей.

**Цель исследования** – обобщить информацию по существующим способам и методам расчетов и прогнозирования продолжительности тепловой стерилизации гетерофазных пищевых продуктов в зависимости от типов и размеров упаковки.

**Задачи:** определить направления исследований по прогнозированию эффективной продолжительности тепловой стерилизации гетерофазных пищевых продуктов.

**Методы и результаты.** Для исследования применяли общепринятые методы: систематизация, анализ и обобщение. Основными объектами анализа являются существующие подходы к применению расчетных методов и компьютерного моделирования процессов термической обработки и режимов стерилизации при производстве консервированных продуктов, описанные в отечественных и зарубежных научных публикациях и патентах.

В гетерофазных системах, к которым относятся и большинство консервированных продуктов, при нагревании возникают конвективные потоки Рэлея-Бенара. Это тип естественной конвекции, возникающей в плоском горизонтальном слое жидкости. При этом термическое воздействие на продукт (нагрев) идет снизу. В результате конвекции жидкость образует регулярную структуру конвективных ячеек, известных как ячейки Бенара. Конвекция Бенара-Рэлея – одно из наиболее часто изучаемых явлений конвекции [10].

Расчет 2D математической модели естественной конвекции в цилиндрических полостях при стерилизации жидких пищевых продуктов основывается на балансе количества движения и энергии и предсказывает как динамику нагрева зоны наименьшего прогревания (SHZ), так и летальность, достигаемую в однородных жидких консервированных продуктах.

Стерилизация жидких пищевых продуктов в банках осложняется воздействием естественных конвекционных потоков, создаваемых горячими стенками банки. Для представления о естественных конвективных процессах, происходящих во время стерилизации консервированных жидких пищевых продуктов, и прогнозирования изменения температуры самой медленной зоны нагрева (SHZ) в процессе стерилизации консервированных жидких пищевых продуктов применяют анализ вычислительной гидродинамики (CFD – computational fluid dynamics).

Авторами Albaali, Ghani разработан упрощенный метод прогнозирования продолжительности стерилизации жидких продуктов в банках разных размеров, базирующийся на анализе компьютерных симуляций CFD. Корреляция построена по аналогии с имеющимся аналитическим решением для теплопроводности в бесконечном цилиндре [11]. Авторы A. Kannan и Sandaka Gourisankar предлагают метод, позволяющий оптимизировать процесс термической стерилизации, где энергопотребление включено в целевую функцию. При этом обеспечиваются унифицированные корреляции для числа Нуссельта как функций числа Фурье, соотношения сторон емкости для пищевых продуктов и теплопроводности пищевой среды в режимах теплопередачи с преобладанием теплопроводности и конвекции. Полученные корреляции могут быть использованы для оценки потоков теплопередачи в зависимости от времени, что при интегрировании приведет к оценке потребления энергии [12].

M. Soleymani Serami с соавторами предлагают модель, основанную на методе вычислительной гидродинамики CFD для прогнозирования изменения температуры и определения зоны самого медленного нагрева (SHZ) при стерилизации тушеного мяса Фесеньяна. Результаты исследований показали, что при достижении температуры 120,3 °C в продукте зона SHZ находится в геометрическом центре контейнера.

Существенного различия между средними экспериментальными температурами в продукте и прогнозируемыми температурами в тех же положениях не наблюдалось ( $p < 0,01$ ). Расчет RMSE (среднеквадратичной ошибки) показал согласованность между результатами моделирования и экспериментальными данными (RMSE = 1,36) [13].

Данные исследований расположения зоны наименьшего прогревания (SHZ) и ее миграции указывают, что она находится в пределах 15 % нижней части банки. Характер миграции зоны оценивается как незначительный. Авторы [14] предлагают математическую модель для подробного прогнозирования режимов потоков и температурных профилей естественного конвекционного нагрева герметизированных жидкостей. Для этого использовали конечно-разностные методы решения основных уравнений Навье-Стокса в осесимметричных цилиндрических координатах. Исследователями использовалась формулировка уравнений, основанная на функции потока завихрений.

В исследовании [15] авторы предлагают компьютерное моделирование с использованием приближенных и термодинамических данных для гетерофазных сред – морковно-апельсинового супа, супа из брокколи и чеддера, томатного пюре и кукурузных сливок. Динамика самой холодной точки и летальности  $F_0$  во всех исследованных пищевых жидкостях в обоих случаях была примерно одинаковой. Точность модели сравнивалась с заявленным временем стерилизации кукурузы в сливочном соусе, упакованной в банку размером 303×406 мм. При прогнозируемой продолжительности стерилизации 66 минут экспериментальные данные продолжительности процесса составили 68 минут при температуре внутри банки 121,1 °С.

Для определения конвекционных процессов положения зоны самого медленного нагрева (SHZ), происходящих при нагреве жидких пищевых продуктов, упакованных в стеклянные банки, авторы [16] применили модель, основанную на решении основных уравнений непрерывности.

В работе [17] для прогнозирования изменения температуры в измельченных пищевых продуктах (различных форм и размеров), упакованных в стеклянные банки, исследователи предлагают способ, основанный на сигмовидной модели. Предлагаемая модель определяет с

высокой точностью процесс нагрева. Модель позволяет рассчитать продолжительность стерилизации, необходимую для обеспечения инактивации микроорганизмов, и в то же время обеспечить минимальную потерю качества из-за чрезмерной обработки. Данный способ прост в использовании и может быть применен как приближенный метод для прогнозирования проникновения тепла в измельченные пищевые продукты с жидкой средой, упакованные в стеклянные банки разного размера.

В работе [18] предложены алгоритмы определения и управления температурно-временными режимами стерилизации. Структура управления синхронно сочетает в себе среды моделирования и моделирования с эффективными инструментами и методами идентификации системы и динамической оптимизации. Моделирование процесса обеспечивает полное динамическое описание текущего состояния операции, включая изменение температуры и давления в ретортном блоке, а также временное и пространственное распределение температуры и параметров качества или безопасности внутри продукта. Такое виртуальное представление будет регулярно сталкиваться с измерениями установки для количественной оценки степени несоответствия (неопределенности) между реальной установкой и моделями и соответствующим образом реагировать, когда такое несоответствие становится неприемлемым, путем переоценки параметров установки либо во время цикла, либо от партии к партии.

Авторы [19] предлагают разработанную модель для изучения распределения температурных показателей в процессе стерилизации модельной среды, представляющую собой 3,5 % дисперсии крахмала, упакованных в цилиндрические контейнеры с 10 % свободным пространством над продуктом. В работе указано, что в процессе стерилизации модельной среды экспериментальная и прогнозируемая динамика изменения температуры в зоне SHZ совпадала. Применение программного обеспечения COMSOL 4.1 для моделирования CFD (вычислительной гидродинамики) показало, что геометрия контейнера оказывает значительное влияние на форму, положение, конечную температуру и летальность. Отмечено, что поддержание температуры в банке 121,1 °С в течение 20 минут приводит к значительному уменьше-

нию  $j$  (параметр проникновения тепла) и увеличению  $F$  по сравнению со временем выдержки 15 минут. Авторы отмечают, что в металлическом контейнере, который содержит жидкости с естественной конвекцией во время процесса нагрева, SHZ находится близко к границе раздела воздух-продукт.

Для определения влияния формы, геометрических размеров и положения банок для пищевых продуктов на характер нагрева обработанных жидких пищевых продуктов и полученные значения летальности в зависимости от продолжительности обработки авторы R. Borah, S. Gupta, L. Mishra, R.P. Chhabra применяли программный комплекс COMSOL Multiphysics (version 5.2). В ходе исследований определено, что геометрия и ориентация банок оказывают значительное влияние на характеристики нагрева / проникновения в отношении применений термической обработки пищевых продуктов для жидкости с фиксированными свойствами. Процесс нагрева развивается через начальную фазу, в которой преобладает проводимость, прокладывая путь для начала конвекции, включающей плавучесть. Сила конвекционного тока ослабевает с уменьшением движущей силы температуры по мере постепенного нагрева жидкости. Полученное значение летальности показывает умеренное влияние угла наклона банки на начальных стадиях процесса термической обработки, в процессе стерилизации эффект снижается. Продолжительность стерилизации также значительно зависит от геометрических параметров. Например, в вертикальной ориентации «очень высокие» цилиндрические банки требуют более длительного времени стерилизации. Однако при горизонтальной ориентации банки сокращается продолжительность стерилизации примерно на 16 % по сравнению с вертикальной ориентацией, также продолжительность процесса дополнительно сокращается на 22 % при изменении соотношения высоты и поперечного сечения банки с 1 на 0,5 (цилиндрическое на эллиптическое) [20].

Авторами [21] предложена программа, разработанная VisualBasic 6.0, графически отображающая кривую проникновения тепла при стерилизации, а также проводящая расчет о достигнутом  $F_0$  от всех датчиков термодатчиков каждые 4,5 с. Программа анализирует достигнутое в наименее прогреваемой зоне значение  $F_0$ , вы-

численное по общему методу, и продолжает процесс, пока не будет достигнуто заданное целевое значение  $F_0$  для этого конкретного продукта. Затем программа будет отображать предупреждающее сообщение для оператора, а расчет  $F_0$  будет продолжаться и во время охлаждения.

Компьютерные программные модели применяются и при подготовке специалистов. Разработан учебный тренажер, использующий имитационную модель тепловых процессов, адекватно описывающую процесс стерилизации и реакцию автоклава на действия системы управления и оператора. В тренажере для моделирования процесса стерилизации в паровой и водной среде применяется программно-аппаратный комплекс MIST (Modernization and Innovation in Sterilization). Математическое моделирование процессов стерилизации показывают высокую степень аппроксимации реализуемых технологических моделей [22].

Существует математическая модель для корреляции четырех параметров проникновения тепла в консервированные продукты, использующая таблицы Stumbo [23]. Расчет идет по данным разницы между температурами реторты и самой холодной точки консервов в конце процесса нагрева SHZ, отношению индекса скорости нагрева к величине стерилизации  $z$  (изменение температуры, необходимое для того, чтобы кривая термического разрушения прошла один логарифмический цикл) и  $J_{cc}$  (коэффициент задержки охлаждения). Поскольку математическая модель может использоваться для прогнозирования промежуточных значений любой комбинации входных данных, то она позволяет быстро и легко автоматизировать расчеты теплового процесса и выполнять эти расчеты с использованием электронной таблицы. Продолжительность термического процесса, рассчитанная с использованием математической модели, представленной в этой работе, и с использованием модифицированной формулы Болла точно соответствовала времени, рассчитанному из табличных значений (RMS = 0,567 мин, средняя абсолютная ошибка = 0,421 мин при стандартном отклонении 0,380 мин). Эта высокая точность прогноза, более высокая, чем у моделей ИНС, позволяет применять их на практике, например для простой оценки параметров тепловых процессов, управляемых компьютерами [24].

В своей работе D. Friso предлагает усовершенствованное математическое решение определения продолжительности процесса нагрева, необходимого для достижения заданной летальности. В отличие от работы [24], где была предложена математическая модель, состоящая из десяти последовательных уравнений, предложенный расчет основан на трех уравнениях. Первое уравнение было получено путем обращения функции, которая выражает летальность процесса,  $F$ , и следовательно, параметра  $fh/U$ . Однако инверсия была возможна для подобласти функции  $g=g(fh/U, z, Jcc)$ . Затем обратная функция была расширена на всю область ( $10^\circ\text{C} \leq z \leq 111^\circ\text{C}$ ,  $fh/U \geq 0,3$  и  $0,4 \leq Jcc \leq 2$ ) с использованием двух многочленов (второе и третье уравнение), полученных с помощью сформулированных множественных регрессий, начиная с наборов данных Stumbo. Более высокая простота и точность предлагаемого расчета, чем модель ANN – «система обработки информации», которая учится на данных Stumbo [25], делают ее полезной при разработке алгоритмов расчета и управления тепловыми процессами пищевых продуктов [26].

Обобщенная компьютерная имитационная модель термической стерилизации консервов с кондукционным нагревом была предложена I. Mohamed. Модель основана на выражении граничных условий в терминах коэффициентов теплопередачи, что позволяет обрабатывать все возможные типы граничных условий в дополнение к обновлению граничных условий во время термической обработки. Разработанная компьютерная программа была основана на неявном методе конечных разностей переменного направления (ADI) с использованием схемы дискретизации Кранка-Николсона. Программа использована для обнаружения холодной точки путем изучения решения температурного профиля вдоль центральной оси [27]. Для моделирования термической обработки консервов и определения зоны SHZ применяется метод, основанный на использовании нейронных сетей, обучаемых на основе начальных условий процесса и температуры реторты. Разработанные нейронные сети (ИНС) прогнозируют изменения температуры наименее прогреваемой точки при нагреве пакетов с модельной средой (крахмальной дисперсией) с температурой  $90^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Разработанная модель успешно спрогнозировала

изменение температуры в зоне SHZ по всему температурному диапазону, с относительной ошибкой для  $F_0$  менее 2 % [28].

**Заключение.** Использование вычислительной техники, процессов моделирования тепло- и массообмена, нейронных сетей делает процесс разработки режимов стерилизации/пастеризации гетерофазных пищевых продуктов менее затратным, при этом полученное сочетание временного и температурного факторов будет минимально воздействовать на пищевой продукт при гарантии его безопасности для потребителя.

Анализ приведенных литературных источников указывает на несколько направлений определения оптимизации режимов тепловой стерилизации пищевых продуктов:

- 1) расчет по разнице значений наименее прогреваемой точки и температуры нагрева банки;
- 2) расчет по значениям между расчетной и полученной летальностью;
- 3) расчет режима с учетом данных таблиц Стумбо;
- 4) расчет по показателям затраченной энергии.

#### Список источников

1. К вопросу применения индикаторов плавления для контроля температурных параметров стерилизации / В.Б. Крылова [и др.] // Все о мясе. 2021. № 2. С. 52–54. DOI: 10.21323/2071-2499-2021-2-52-54.
2. Шульгина Л.В., Лаженцева Л.Ю., Блинов Ю.Г. Регулирование микробных процессов при стерилизации морепродуктов // Известия ТИНРО. 2017. № 188 (1). С. 237–243. DOI: 10.26428/1606-9919-2017-188-237-243.
3. Featherstone S.A. Complete Course in Canning and Related Processes, 2015. № 2, pp. 3–25. DOI: 0.1016/B978-0-85709-678-4.00001-4.
4. Stier R. Swainson's Handbook of Technical and Quality Management for the Food Manufacturing Sector, 2019. pp. 505–527.
5. Сенкевич В.И. Научные основы режимов финишной стерилизации жидких консервируемых пищевых систем // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Процессы и аппараты

- пищевых производств. 2021. № 2 (48). С. 53–67. DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-2-53-67.
6. Миграция зоны наименьшего прогревания в гетерофазной модельной пищевой системе при стерилизации / В.В. Кондратенко [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2021. № 11 (176). С. 188–197. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-11-188-197.
  7. *Montanari A., Barone C., Barone M., Santangelo A.* Canned Foods: Principles of Thermal Processing. In: Thermal Treatments of Canned Foods. Springer Briefs in Molecular Science. 2018. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-74132-1\_1.
  8. Thermal treatments of canned foods / J. Chen [et al.] // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2018. № 410. pp. 5099–5100. DOI: 10.1007/s00216-018-1158-8.
  9. *Etzel M.R., Willmore P., Ingham B.H.* Heat penetration and thermocouple location in home canning // Food Science & Nutrition. 2015. № 3. pp. 25–31. DOI: 10.1002/fsn3.185.
  10. *Zhu A., Zhou X.* Flow structures of turbulent Rayleigh–Bénard convection in annular cells with aspect ratio one and larger // Acta Mech. 2021. № 37, pp. 1291–1298. DOI: 10.1007/s10409-021-01104-z.
  11. *Albaali G., Farid M.* A new computational technique for the estimation of sterilization time in canned food // Chem. Eng. Process., 2004. № 43, pp. 523–531. DOI: 10.13140/RG.2.1.4737.8008.
  12. *Aravamudan K., Sandaka G.* Heat transfer analysis of canned food sterilization in a still retort // J. Food Eng., 2008. № 88, pp. 213–228. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.02.007.
  13. *Soleymani Serami M., Ramezan Y., Khashehchi M.* CFD simulation and experimental validation of in-container thermal processing in Fesenjan stew // Food SciNutr. 2020. № 9 (2), pp. 1079–1087. DOI: 10.1002/fsn3.2083.
  14. *Datta K., Teixeira A.* Numerical Modeling of Natural Convection Heating in Canned Liquid Foods // Transactions of the ASAE, 1987. № 30. pp. 1542–1551. DOI: 10.13031/2013.30600.
  15. Effect of two viscosity models on lethality estimation in sterilization of liquid canned foods / M.P. Calderón-Alvarado [et al.] // Food Sci. Technol. Int., 2016. № 22(6). pp. 496–515. DOI: 10.1177/1082013215627393.
  16. *Lespinard A.R., Mascheroni R.H.* Influence of the geometry aspect of jars on the heat transfer and flow pattern during sterilization of liquid foods // J. Food Process Eng., 2012. № 35 (5), pp. 751–762. DOI: 10.1111/j.1745-4530.2010.00624.x.
  17. *Lespinard A., Bambicha R., Mascheroni R.* Quality parameters assessment in kiwi jam during pasteurization. Modelling and optimization of the thermal process // Food and Bioproducts Processing. 2012. № 90, pp. 799–808. DOI: 10.1016/j.fbp.2012.03.001.
  18. Real time optimization for quality control of batch thermal sterilization of prepackaged foods / A. Alonso [et al.] // Food Control. 2013. № 32, pp. 392–403. DOI: 10.1016/j.foodcont.2013.01.002.
  19. *Ranjbar N.* Numerical Calculation F-value and Lethality of Non-Newtonian Food Fluid during Sterilization based on Can Geometry // Iranian Food Science and Technology Research Journal. 2019. № 14 (6), pp. 113–125. DOI: 10.22067/ifstrj.v0i0.71219.
  20. Heating of liquid foods in cans: Effects of can geometry, orientation, and food rheology / R. Borah [et al.] // Journal of food process engineering. 2020. v. 43 №. 7. e13420. DOI: 43.10.1111/jfpe.13420.
  21. *Chamchong M., Sangsom V., Charoemkitt N.* Computer-Based On-Line Assessment of Sterilizing Value and Heat Distribution in Retort for Canning Process. 2012. DOI: 10.5772/34617.
  22. Development of an Autoclave Thermal Processes Model for the Simulator of Canned Food Sterilization Process / A. Kaychenov [et al.] // KnE Life Sciences. 2020. v. 5. № 1. pp. 437–449. DOI: 10.18502/kls.v5i1.6103.
  23. *Holdsworth S.D., Simpson R.* Sterilization, Pasteurization, and Cooking Criteria. In: Thermal Processing of Packaged Foods. Food Engineering Series. Springer, Cham. (2016) DOI: 10.1007/978-3-319-24904-9\_4.
  24. *Friso D.* Modell. Simul. Eng. 2013. Article ID 569473. pp. 1–8. DOI: 10.1155/2013/569473.
  25. *Sablani S.S., Shayya W.H.* Computerization of Stumbo's method of thermal process calculations using neural networks // J. Food Eng. 2001. № 47. pp. 233–240. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00121-7.

26. Friso D. Design Applied Mathematical Sciences. 2015. № 9 (6), pp. 255–270. DOI: 10.12988/ams.2015.411980.
27. Mohamed I. Modeling and Simulation of Thermal Sterilization of Conduction Heat Canned Foods Using Heat Transfer Coefficients Boundary Conditions. // International Journal of Food Processing Technology. 2016. № 3 (2), pp. 48–53. DOI: 10.15379/2408-9826.2016.03.02.03.
28. Llave Y., Hagiwara T., Sakiyama T. Artificial neural network model for prediction of cold spot temperature in retort sterilization of starch-based foods // Journal of Food Engineering. 2012. № 109. pp. 553–560. DOI: 10.1016/J.JFOODENG.2011.10.024.
8. Thermal treatments of canned foods / J. Chen [et al.] // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2018. № 410. pp. 5099–5100. DOI: 10.1007/s00216-018-1158-8.
9. Etzel M.R., Willmore P., Ingham B.H. Heat penetration and thermocouple location in home canning // Food Science & Nutrition. 2015. № 3. pp. 25–31. DOI: 10.1002/fsn3.185.
10. Zhu A., Zhou X. Flow structures of turbulent Rayleigh-Bénard convection in annular cells with aspect ratio one and larger // Acta Mech. 2021. № 37, pp. 1291–1298. DOI: 10.1007/s10409-021-01104-z.
11. Albaali G., Farid M. A new computational technique for the estimation of sterilization time in canned food // Chem. Eng. Process., 2004. № 43, pp. 523–531. DOI: 10.13140/RG.2.1.4737.8008.

### References

1. K voprosu primeneniya indikatorov plavleniya dlya kontrolya temperaturnyh parametrov sterilizacii / V.B. Krylova [i dr.] // Vse o myase. 2021. № 2. S. 52–54. DOI: 10.21323/2071-2499-2021-2-52-54.
2. Shul'gina L.V., Lazhenceva L.Yu., Blinov Yu.G. Regulirovanie mikrobnih processov pri sterilizacii moreproduktov // Izvestiya TINRO. 2017. № 188 (1). S. 237–243. DOI: 10.26428/1606-9919-2017-188-237-243.
3. Featherstone S.A Complete Course in Canning and Related Processes, 2015. № 2, pp. 3–25. DOI: 0.1016/B978-0-85709-678-4.00001-4.
4. Stier R. Swainson's Handbook of Technical and Quality Management for the Food Manufacturing Sector, 2019. pp. 505–527.
5. Senkevich V.I. Nauchnye osnovy rezhimov finishnoj sterilizacii zhidkih konserviruemih pischevyh sistem // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Ser. Processy i apparaty pischevyh proizvodstv. 2021. № 2 (48). S. 53–67. DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-2-53-67.
6. Migraciya zony naimen'shego progrevaniya v geterofaznoj model'noj pischevoj sisteme pri sterilizacii / V.V. Kondratenko [i dr.] // Vestnik KrasGAU. 2021. № 11 (176). S. 188–197. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-11-188-197.
7. Montanari A., Barone C., Barone M., Santangelo A. Canned Foods: Principles of Thermal Processing. In: Thermal Treatments of Canned Foods. Springer Briefs in Molecular Science. 2018. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-74132-1\_1.
12. Aravamudan K., Sandaka G. Heat transfer analysis of canned food sterilization in a still retort // J. Food Eng., 2008. № 88, pp. 213–228. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.02.007.
13. Soleymani Serami M., Ramezan Y., Khashehchi M. CFD simulation and experimental validation of in-container thermal processing in Fesenjan stew // Food SciNutr. 2020. № 9 (2), pp. 1079–1087. DOI: 10.1002/fsn3.2083.
14. Datta K., Teixeira A. Numerical Modeling of Natural Convection Heating in Canned Liquid Foods // Transactions of the ASAE, 1987. № 30. pp. 1542–1551. DOI: 10.13031/2013.30600.
15. Effect of two viscosity models on lethality estimation in sterilization of liquid canned foods / M.P. Calderón-Alvarado [et al.] // Food Sci. Technol. Int., 2016. № 22(6). pp. 496–515. DOI: 10.1177/1082013215627393.
16. Lespinard A.R., Mascheroni R.H. Influence of the geometry aspect of jars on the heat transfer and flow pattern during sterilization of liquid foods // J. Food Process Eng., 2012. № 35 (5), pp. 751–762. DOI: 10.1111/j.1745-4530.2010.00624.x.
17. Lespinard A., Bambicha R., Mascheroni R. Quality parameters assessment in kiwi jam during pasteurization. Modelling and optimization of the thermal process // Food and Bioproducts Processing. 2012. № 90, pp. 799–808. DOI: 10.1016/j.fbp.2012.03.001.

18. Real time optimization for quality control of batch thermal sterilization of prepackaged foods / A. Alonso [et al.] // *Food Control*. 2013. № 32, pp. 392–403. DOI: 10.1016/j.foodcont.2013.01.002.
19. *Ranjbar N.* Numerical Calculation F-value and Lethality of Non-Newtonian Food Fluid during Sterilization based on Can Geometry // *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 2019. № 14 (6), pp. 113–125. DOI: 10.22067/ifstrj.v0i0.71219.
20. Heating of liquid foods in cans: Effects of can geometry, orientation, and food rheology. / *R. Borah* [et al.] // *Journal of food process engineering*. 2020. v. 43 №. 7. e13420. DOI: 43.10.1111/jfpe.13420.
21. *Chamchong M., Sangsom V., Charoemkitt N.* Computer-Based On-Line Assessment of Sterilizing Value and Heat Distribution in Retort for Canning Process. 2012. DOI: 10.5772/34617.
22. Development of an Autoclave Thermal Processes Model for the Simulator of Canned Food Sterilization Process / *A. Kaychenov* [et al.] // *KnE Life Sciences*. 2020. v. 5. № 1. pp. 437–449. DOI: 10.18502/kls.v5i1.6103.
23. *Holdsworth S.D., Simpson R.* Sterilization, Pasteurization, and Cooking Criteria. In: *Thermal Processing of Packaged Foods*. Food Engineering Series. Springer, Cham. (2016) DOI: 10.1007/978-3-319-24904-9\_4.
24. *Friso D.* Modell. Simul. Eng. 2013. Article ID 569473. pp. 1–8. DOI: 10.1155/2013/569473.
25. *Sablani S.S., Shayya W.H.* Computerization of Stumbo's method of thermal process calculations using neural networks // *J. Food Eng.* 2001. № 47. pp. 233–240. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00121-7.
26. *Friso D.* Design Applied Mathematical Sciences. 2015. № 9 (6), pp. 255–270. DOI: 10.12988/ams.2015.411980.
27. *Mohamed I.* Modeling and Simulation of Thermal Sterilization of Conduction Heat Canned Foods Using Heat Transfer Coefficients Boundary Conditions. // *International Journal of Food Processing Technology*. 2016. № 3 (2), pp. 48–53. DOI: 10.15379/2408-9826.2016.03.02.03.
28. *Llave Y., Hagiwara T., Sakiyama T.* Artificial neural network model for prediction of cold spot temperature in retort sterilization of starch-based foods // *Journal of Food Engineering*. 2012. № 109. pp. 553–560. DOI: 10.1016/J.JFOODENG.2011.10.024.

Статья принята к публикации 07.03.2022 / The article accepted for publication 07.03.2022.

Информация об авторах:

**Алексей Александрович Королев**<sup>1</sup>, ведущий научный сотрудник лаборатории процессов и аппаратов, кандидат технических наук

**Наталья Евгеньевна Посокина**<sup>2</sup>, заведующая лабораторией технологии консервирования, кандидат технических наук

Information about the authors:

**Alexey Alexandrovich Korolev**<sup>1</sup>, Leading Researcher, Laboratory of Processes and Apparatus, Candidate of Technical Sciences

**Natalya Evgenievna Posokina**<sup>2</sup>, Head of the Laboratory of Canning Technology, Candidate of Technical Sciences

