

Динамика термического процесса инаktivации микроорганизмов при установлении режимов ультрапастеризации консервируемых продуктов

М.Т. Левшенко, lev-mika@yandex.ru

В.И. Сенкевич, vnikop@gmail.com

*Всероссийский научный исследовательский институт технологии консервирования – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН
142703, Россия, Московская обл., Видное, Школьная ул., 78*

Описаны методы и приборы для экспериментальных исследований прогревов консервируемых продуктов, инокулированных спорами тест-микроорганизмов в обычно используемых в термобактериологии стеклянных капиллярах и предлагаемых блистерах из фольги, приведены результаты математической обработки термограмм. Цель исследований – создание методики и технических средств для установления режимов ультрапастеризации консервируемых продуктов из фруктов и овощей в реальных условиях термоинаktivации спор тест-микроорганизмов. Описанные процедуры и приборы доступны для применения в условиях производственных лабораторий предприятий по производству консервов. Получены параметры математических моделей термической инерции продуктов при прогревах в блистерах разной вместимости и используемых бескорпусных датчиков температуры продукта. Анализ полученных результатов позволяет рекомендовать блистеры с объемом продуктов 0,1÷0,5 мл и толщиной пакета до 1,5 мм для исследований термоинаktivации спор микроорганизмов при температурах свыше 110°C и экспозиции не менее 2 с. Приведены данные прогревов зерен фасоли и гороха в средах, соответствующих вырабатываемым консервам для оценки необходимой термообработки гетерогенных продуктов при стерилизации. Показаны области применения и преимущества предложенной системы сбора термобактериологических данных на основе бескорпусных малоинерционных термопар для установления режимов кратковременной термической стерилизации и ультрапастеризации. Увеличение экспозиции термообработки образцов за счет тепловой инерции предложенных блистеров для жидких и пюреобразных продуктов до 1 мл составит по сравнению с мгновенным достижением изотермических условий не более 1 с.

Ключевые слова: ультрапастеризация; высокотемпературный кратковременный режим; режимы стерилизации; споры тест-микроорганизмов; время прогрева; блистер.

DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-4-67-77

Dynamics for the thermal process of microorganism inactivation while setting the modes of ultrapasterization for canned food

Mikhail T. Levshenko, lev-mika@yandex.ru

Vyacheslav I. Senkevich, vnikop@gmail.com

*Russian Research Institute of Canning Technology – Branch of V. M. Gorbатов Research Center for Food Systems of RAS
78, Shkolnaya str., Vidnoe, Moscow region, 142703, Russian*

The article presents the methods and equipment for experimental studies of come-up time for canned food inoculated with spores of test microorganisms in conventional and glass capillaries and polymer blisters. The results of thermograms' mathematical processing are shown. The research is aimed at the development of a technique for setting the modes of ultrapasteurisation for canned fruit and vegetables under real conditions of inactivating spores of test microorganisms. The described procedures and devices are available for use in the conditions of laboratories at canning factories. The parameters of mathematical models for thermal inertia of come-up in blisters of various volume and unpackaged sensors of product temperature are demonstrated. The analysis of the results obtained allows recommending the blisters of 0.1÷0.5 ml volume and the thickness of up to 1.5 mm for investigating thermoactivation of microorganisms' spores at the temperature higher than 110°C and the time of exposure of not less than 2 sec. The data on come-up time for peas and beans in an environment equal to the canned food produced to evaluate the necessary time of sterilization for heterogeneous products are shown. The fields of application and advantages of the proposed system of thermo-bacteriological data collection based on unpackaged quick-response thermocouples for establishing modes of high-temperature-short-time and ultrapasteurisation are presented. Increased thermal exposure of the samples due to the rate of thermal inertia for the blisters in question (for liquid and pure-like food) of up to 1 ml is no more than 1 s compared to instantaneous reaching isothermal conditions.

Keywords: ultrapasteurisation; high-temperature-short-time regime; sterilization modes; spores of test microorganisms; come-up time; blister; capillary tube.

Введение

Производство консервированных соков и напитков – быстро развивающаяся отрасль пищевой промышленности в мире. Наиболее перспективной технологией консервирования этих продуктов является ультрапастеризация (англ. high-temperature-short-time – HTST). Такая обработка уничтожает патогенные и спойлинговые микроорганизмы продукта. Для HTST обработки продуктов переработки молока, фруктов, овощей выпускают ультрапастеризационные установки непрерывного действия с последующей упаковкой продукта в асептических условиях. В России доля ультрапастеризованных продуктов переработки фруктов и овощей очень мала. Одна из причин этого – отсутствие достаточной базы обоснованных режимов HTST обработки.

Научной основой установления режимов пастеризации и стерилизации при производстве консервов является определение терморезистентности спор тест-микроорганизмов (тм) в продуктах в реальных условиях технологического процесса производства и применяемого оборудования [1–3]. Прогревы споровых суспензий тм при экспериментальном определении их терморезистентности проводят в различных устройствах: стеклянных капиллярах и пробирках [4], колбах, металлических трубках [5] контейнерах [6, 7], терморезистометре [8]. Выбор технических средств для исследований определяется критериями необходимой величины аликвоты не менее 0,1 мл для получения достоверных данных численности исследуемой популяции тм, минимизации времени ее прогрева до необходимой температуры (англ. CUT) [6] до заданного значения температуры обработки $t_{ст}$. Для жидких и гомогенизированных пюреобразных продуктов наиболее часто при определении терморезистентности используют стеклянные капилляры [7, 8].

Особенностью ультрапастеризации является высокая температура процесса термоинактивации ($t_{ст} \geq 120^\circ\text{C}$) при ультракороткой экспозиции $\tau_{ст} = 2 \div 45$ с [9] и быстром охлаждении. В связи с этим, критерием установления метода и технических средств режимов ультрапастеризации являются темп $\frac{dt}{dt}$ прогрева популяции от температуры анабиоза ($t_{ан} = 0 \div 5^\circ\text{C}$) [9] до изотермических условий ультрапастеризации ($t_{ст} = 100 \div 120^\circ\text{C}$) и темп последующего охлаждения до температуры, не имеющей ингибирующего воздействия на тм ($t_2 \leq 50^\circ\text{C}$) [9]. CUT известных устройств составляет больше 5 с [4–7], что сопоставимо со временем изотермической обработки при ультрапастеризации и HTST [6, 10].

Одной из причин выявленных отклонений от экспоненциального характера термоинактивации в начальной фазе прогревов тм считают значительное время CUT [9], так как при этом споры находятся в нестационарном поле температуры. В связи с этим минимизация CUT аликвоты уменьшит или исключит возможное влияние переменной температуры на данные для установления достоверных количественных параметров терморезистентности спор тм.

Терморезистометр [9] обеспечивает необходимый темп прогрева тм, но как указывают авторы исследований [6], он является уникальным и чрезмерно дорогостоящим, даже для больших университетских лабораторий, не говоря уже о производственных лабораториях предприятий, для которых преимущественно предназначена наша информация. Кроме того, максимально возможный объем шести одновременно исследуемых образцов всего по 0,02 мл, они находятся в открытых корытцах (boat) в стерилизационной камере с избыточным давлением пара, и для предотвращения вскипания при их охлаждении перед погружением в пробирки для культивирования, требуется значительное время [9].

Целью настоящей работы является анализ применяемых в термобактериологии консервной промышленности методов и технических средств, исследование термодинамики прогреваемости контаминированных продуктов в капиллярах и блистерах, средств измерений температуры продуктов при прогревах и определение границ их применимости для получения достоверных данных терморезистентности тм.

Материалы и методы исследований

Оценена термодинамика применяемых в исследованиях стеклянных трубок-капилляров наружным диаметром 2,5 мм, с толщиной стенки около 0,25 мм, длиной 70 мм, средней массой

брутто 425 мг [10, 11] (рисунок 1). При прогревах их размещали по 3 шт. на сетчатом носителе. Графическое отображение данных средних значений динамики температуры t прогревов 0,1 мл гомогенизированного яблочного пюре параллельно в трех капиллярах в трехкратной повторности приведены на рисунке 2.

Для сравнения данных термограмм, полученных для различных продуктов и условий прогревов – разной температуры греющей среды t_c , разной начальной температуры аликвоты продукта t_1 ($^{\circ}\text{C}$), в едином масштабе ординат на графиках и в расчетах приведена безразмерная температура θ [12], значение которой определяли по формуле

$$\theta = \frac{t-t_1}{t_c-t_1}. \quad (1)$$

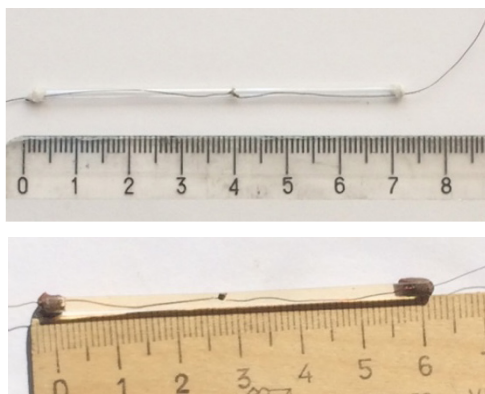


Рисунок 1 – Капилляр с яблочным соком и термопарой МК
 Figure 1. Capillary with apple juice and copper-constantan thermocouple

Главным объектом исследований служили блистеры для прогревов спор тм в разных продуктах до температуры ультрапастеризации $\geq 110^{\circ}\text{C}$, которые изготавливали из алюминиевой фольги ФТЛ по ГОСТ 745-2014 толщиной 40 мкм и медной фольги ГОСТ 5638-75 толщиной 50 мкм (рисунок 2). Герметизацию боковых сторон блистеров выполняли сваркой термолаком и пайкой, а ввода термоэлектродов заваркой или эпоксидной смолой. Для снижения влияния паровоздушного пузыря на показания температуры при прогреве из незаполненного продуктом пространства блистера выдавливают воздух при запайке последнего шва.

Размеры блистера определяют по объему аликвоты V (мл) продукта с суспензией тм. Для уменьшения СУТ толщина блистера с пюреобразными, протертыми и дроблеными продуктами должна составлять $\sim 1,5$ мм, а для жидких продуктов $\leq 0,5$ мм.

Перед прогревами заполненные продуктом укупоренные капилляры и блистеры закрепляют на рамках, причем один образец оснащен термопарой, рабочий спай которой расположен в центре продукта (рисунок 1 и 2).

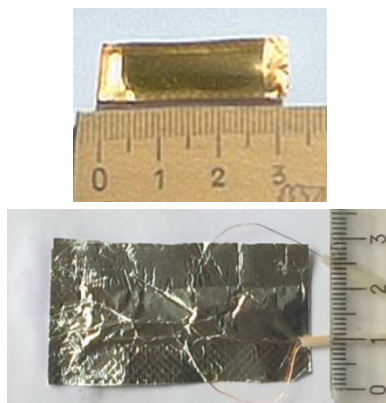


Рисунок 2 – Блистеры из фольги 50 мкм с 0,1 мл яблочного сока сверху, из фольги 40 мкм с 0,5 мл яблочного пюре снизу с термопарой МК
 Figure 2. Foil blisters of 50 micrometers with 0.1 ml of apple juice (upper picture) and of 40 micrometers with 0.5 ml of apple puree (lower picture) and copper-constantan thermocouple

Рамки с заполненными капиллярами или блистерами при прогревах погружают в ультратермостат с глицерином, нагретым до температуры ультрапастеризации $t_{ст} = 110\div 120^{\circ}\text{C}$ и синхронно включают регистрацию температуры продукта t ($^{\circ}\text{C}$). Для улучшения теплоотдачи к поверхностям капилляров и блистеров в термостате включают максимальное перемешивание глицерина.

После стабилизации температуры продукта в упаковке на значении, близком к температуре греющей среды, в термостате $t_{ст}$ выдерживают необходимую экспозицию термостатирования $\tau_{ст}$ (на рисунке 1 $\tau_{ст} = 10$ с), вынимают капилляры или блистеры из термостата и быстро погружают в ледяную воду с температурой $\leq 4^{\circ}\text{C}$. После охлаждения блистеры с суспензией тм отправляют для инкубирования и количественных определений результатов терминактиваии. Графики прогревов продуктов в блистерах разной вместимости приведены на рисунке 6.

Исследована прогреваемость твердых компонентов овощных консервов – зеленого горошка, зерен фасоли – для установления режимов раздельной стерилизации твердых и жидких компонентов гетерогенных продуктов при асептическом консервировании. Необходимость изучения их прогреваемости объясняется тем, что основным источником контаминации гетерофазных продуктов – компотов, натуральных консервов, обеденных блюд – является твердая фаза – овощи, фрукты, грибы, особенно имеющие незначительные повреждения, незамеченные при инспектировании сырья. В связи с этим для установления и прослеживания режимов стерилизации при исследованиях и на производстве важно проводить мониторинг критических контрольных точек, которыми являются температурное поле в жидкой фазе продукта (сиропе, заливке, соусе) и главным образом параметры теплового воздействия на твердые компоненты продукта.

Прогревы плодов проводили в той жидкой фазе, которая соответствует традиционной рецептуре соответствующих консервов – 1,5% растворе соли и сахара с температурой $\sim 105^{\circ}\text{C}$ [13], а температуру в центре плодов измеряли также бескорпусными медь-константановыми (МК) термопарами. Перед прогревами плоды подготавливали по действующим технологическим инструкциями на натуральную фасоль по ГОСТ Р 54679-2011, зеленый горошек по ГОСТ 34112-2017. Определяющие геометрические размеры плодов измеряли штангенциркулем и линейкой, массу плодов на лабораторных весах Ohaus PA114C.

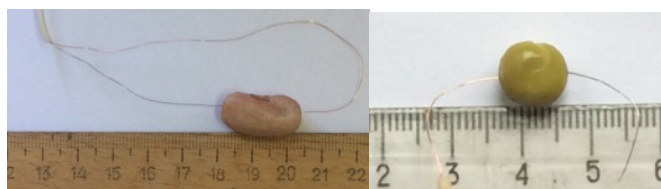


Рисунок 3 – Фасоль (слева) и горох (справа) с бескорпусными термопарами МК Ø 0,15 мм
 Figure 3. Bean (left) and pea (right) with copper-constantan unpackaged thermocouples of 0.15 mm diameter

На рисунке 3 показаны зерна фасоли и горошка с бескорпусными термопарами МК, на которых зерна погружали в заливку, а графики средних значений температуры в центре зерен при прогревах в трех повторностях на рисунке 10.

При исследованиях динамических характеристик процесса нагрева при НТСТ важным фактором является не только высокая точность определения температуры продукта, но и быстродействие измерительной системы.

Для установления влияния инерционных параметров датчиков температуры продукта при меняемых в экспериментах определены постоянные времени T_{τ} МК (медь-константановой) игольчатой термопары с диаметром корпуса 1,2 мм из комплекта системы контроля параметров стерилизации E-Val (Ellab A/S, Дания) и самодельных бескорпусных термопар. Время установления 99,5% значения температуры игольчатой термопары составило 4 с (рисунок 6), что вносит дополнительную динамическую погрешность контроля НТСТ процесса [9].

Для повышения быстродействия измерений температуры суспензии тм в капиллярах, блистерах с продуктами, в зернах гороха и фасоли использовали самодельные отожженные бескорпусные термопары с термоэлектродами ТМК Ø 0,15 мм и ТХК (хромель-копель) Ø 0,16 мм изолированными лаком ФЛ-560. Масса рабочего спая и термоэлектродов в капилляре и блистерах составляла не более 18 мг. От рабочего спая термоэлектроды разведены в стороны чтобы исключить односторонний

теплоотвод и упростить ввод термоэлектродов в объект измерений (рисунок 3). Статические характеристики термопар предварительно проверены и отбракованы по реперным точкам 120; 100; 0°C на соответствие их номинальным по ГОСТ Р 8.585-2001.

Транслировали данные от термопар на PC через внешнее USB устройство сопряжения ЛА-50USB, имеющее 16 аналоговых каналов измерений. Частоту опроса канала устанавливали 100 Гц, с приведенной статической погрешностью сдвига 1 мВ. Предварительное усиление ЭДС термопар выполнено на операционном усилителе OP777 Analog Devices, который вместе с навесными резисторами R1 и R2 монтировали на коммутационной плате ЛА-ТКА50А, подключенной к аналоговому интерфейсу ЛА-50USB (рисунок 4). ИМС OP777 является прецизионным схмотехнически стабилизированным усилителем с ультранизкими: напряжением смещения и дрейфа не более 1 мкВ, тока смещения 1 рА, с низким уровнем температурных шумов. Размах выходных сигналов усилителя от 0 до напряжения питания +5В.

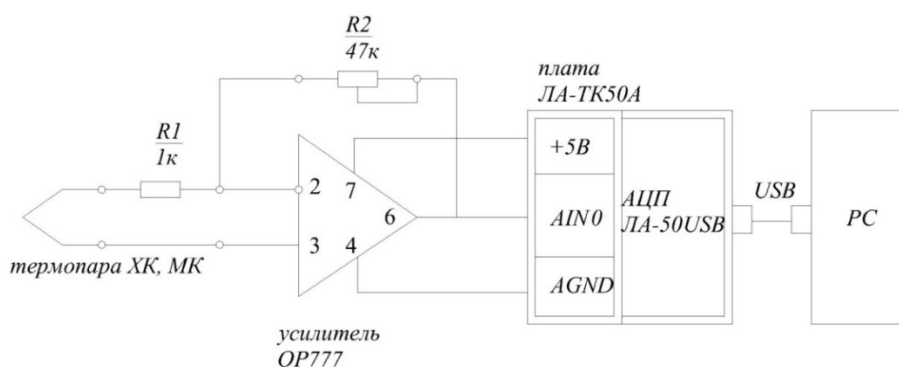


Рисунок 4 – Схема регистрации динамики термопар на PC
 Figure 4. Registration of thermocouple dynamics at computer

Переменным резистором отрицательной обратной связи R2 усилителя OP777 (рисунок 4) устанавливали коэффициент усиления $k = \frac{R2}{R1}$ для термопар: ХК $k \approx 15$, для МК $k \approx 25$ с контролем выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ по реперным температурам 0 и 100°C. Выход усилителя 6 соединяли с одним из аналоговых входов AIN преобразователя ЛА-50USB. Шину интерфейса USB-2 преобразователя соединяли с шиной USB PC и на драйвере ЛА-50USB программно выставляли величину преобразования его АЦП для максимального входного напряжения $U_{\text{вх}} = 100$ мВ. Питание усилителя OP777 от цифровой шины ЛА-50 стабилизированным напряжением +5В. Общая точка усилителя и минусовая шина питания 4 соединены с аналоговой землей ЛА-50USB.

Записи данных в доступной для анализа и визуализации форме на PC выполняли небольшой программой в среде Visual Basic for Application, синхронизирующей начало приема данных от термопар в таблицу Excel с погружением их в термостат. Для повышения точности и помехоустойчивости запись данных производили с программным усреднением по 5 точкам. Поэтому, при настроенной драйвером частоте опроса датчиков 100 Гц, данные для анализа термограмм в Excel таблицах заполняются с интервалом 0,05 с на канал.

Поскольку для анализа динамики термопар и продуктов в блистерах по безразмерной температуре θ важны не абсолютные значения измеряемой температуры t , а темп прогрева $\frac{d\theta}{d\tau}$, то температуру свободных концов термопар определяли не с помощью отдельной компенсационной схемы, а программно, по имеющемуся в ЛА-50USB датчику температуры его платы. Цикл каждого прогрева и измерения составлял не более 10 мин. За это время в условиях лаборатории температура воздуха, окружающего измерительную систему, не изменялась, поэтому точность определения температуры свободных концов термоэлектродов по данным датчика ЛА-50USB была достаточной.

Результаты и обсуждение

Полученные данные динамики безразмерной температуры продуктов $\theta(\tau)$ (1) в капиллярах (рисунок 1) и блистерах (рисунок 2) аппроксимировали модифицированным методом Симою [14, 15] к экспоненциальной функции, которая является решением линейного неоднородного

дифференциального уравнения второго порядка (2) с постоянными коэффициентами a_1, a_2 , имеющими размерность времени $\tau \in [0, \infty)$:

$$a_1 \frac{d^2\theta}{d\tau^2} + a_2 \frac{d\theta}{d\tau} + \theta = \theta_{\text{вх}}(\tau), \tag{2}$$

при начальных условиях $\tau = 0$ с, $\theta(0) = 0$, $\theta'(0) = 0$ и скачкообразном входном воздействии – быстром погружении продукта с температурой $t_0 \approx 0^\circ\text{C}$ в термостат с температурой среды $t_{\text{ст}}$ в диапазоне $t_{\text{ст}} = 100 \div 120^\circ\text{C}$.

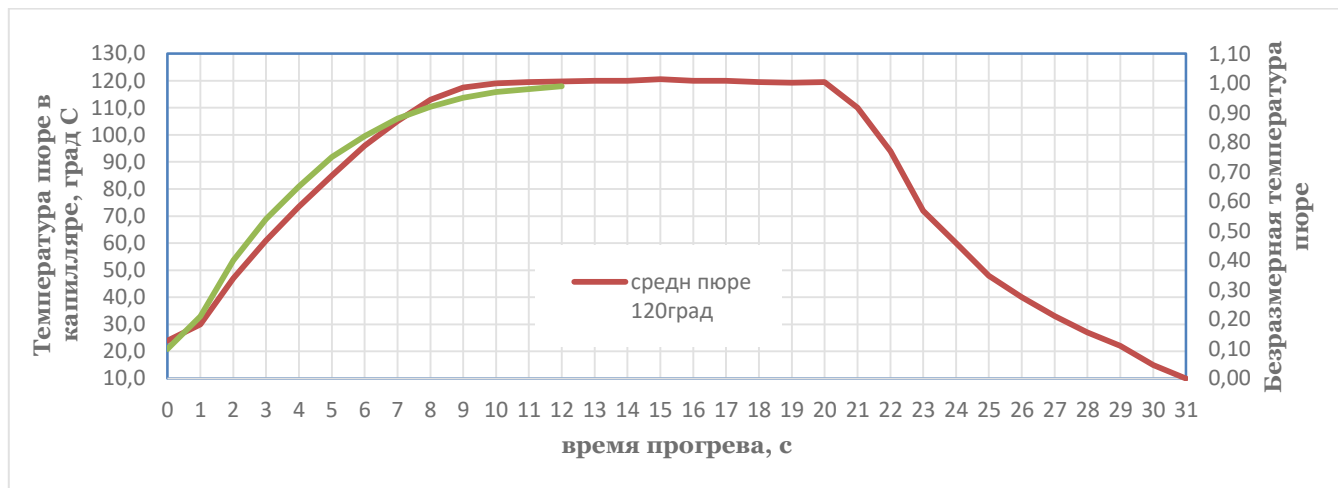


Рисунок 5 – Графики абсолютной и безразмерной температуры прогрева ~ 0,1 мл гомогенизированного яблочного пюре в капилляре и расчетной кривой для показателя инерции капилляра $T_n = 3,66$ с
 Figure 5. Absolute and non-dimensional come-up temperature for 0.1 ml of homogenized apple puree in capillary and design curve for inertia value of capillary $T_n = 3.66$ s

На рисунке 6 показаны кривые теплопроникновения, полученные из средних значений данных температуры прогревов сока и пюре в трех повторностях, и кривые, построенные по расчетным данным аппроксимации динамики температуры уравнением (2) по формуле (5).

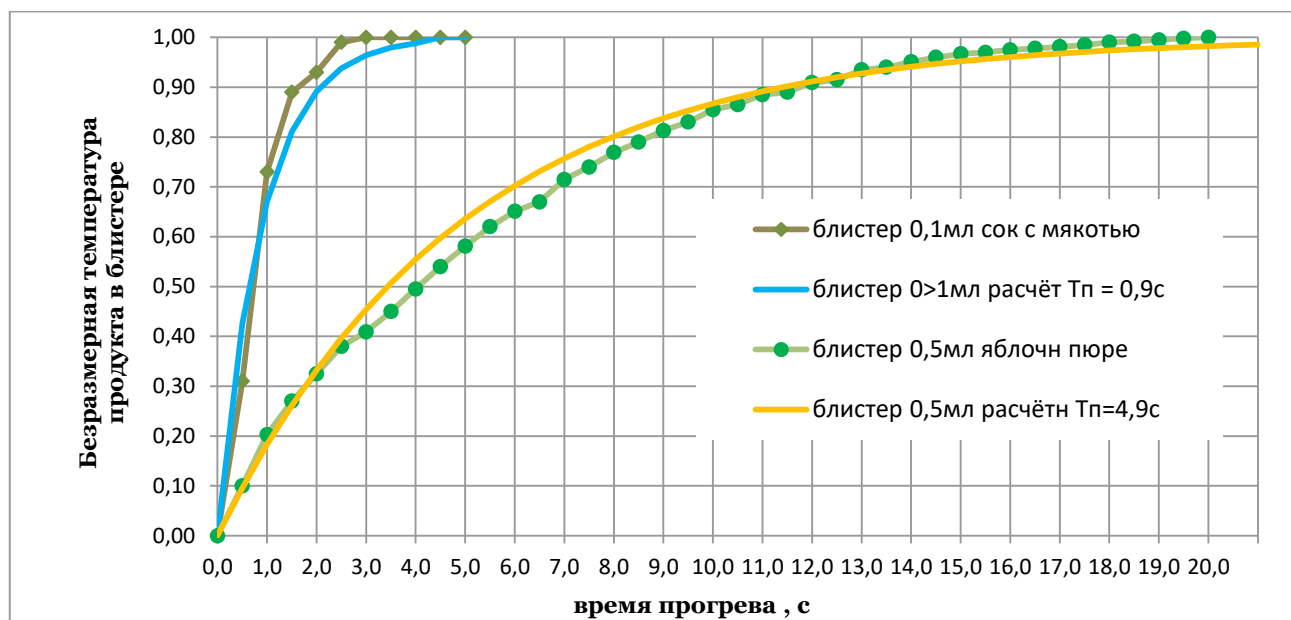


Рисунок 6 – Графики прогревов в блистерах 0,1 мл яблочного сока с мякотью 14% водорастворимых сухих веществ и 0,5 мл яблочного пюре 22% врсв
 Figure 6. Come –up for 0.1 ml of apple nectar (14% of water-soluble solids) and 0.5 ml of apple puree (22% of water-soluble solids) in blisters

Приведенное к безразмерной температуре среды нагрева капилляра или блистера $\theta_{\text{вх}}(\tau)$ по (1) скачкообразное изменение входной величины модели описывается функцией Хевисайда [16]

$$\theta_{\text{вх}}(\tau) = \begin{cases} \forall \tau < 0, 0 \\ \forall \tau \geq 0, 1 \end{cases} \tag{3}$$

В результате аппроксимации температуры продукта – переходной функции $\theta(\tau)$ для указанного входного воздействия $1(\tau)$ по (3) получены значения коэффициентов дифференциального уравнения (2): для капилляра $a_1 = 0,286c^2$, $a_2 = 3,86c$; для блистеров: 0,1 мл – $a_1 = 0,08c^2$, $a_2 = 0,9c$; 0,5 мл – $a_1 = 0,48c^2$, $a_2 = 4,9c$. Так для блистера 0,1 мл уравнение 2 имеет вид

$$0,286 \frac{d^2\theta}{d\tau^2} + 3,86 \frac{d\theta}{d\tau} + \theta = 1(\tau).$$

Этой модели соответствует последовательное соединение двух теплоинерционных звеньев: продукта в упаковке с показателями тепловой инерции: T_n и датчика температуры T_T . Структура модели из передаточных функций измерительной системы прогревов продукта в капиллярах и блистерах показана на рисунке 7.

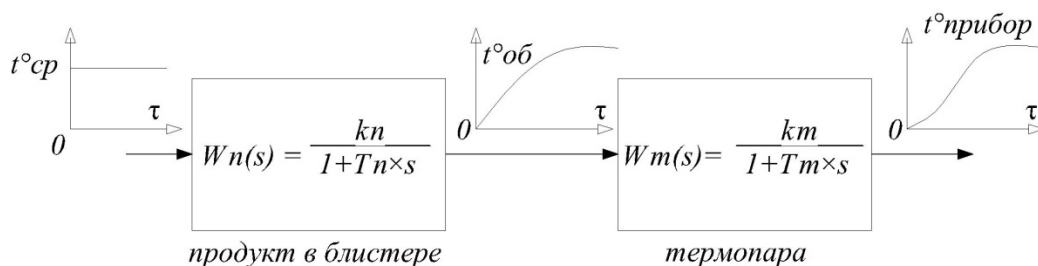


Рисунок 7 – Схема динамической модели измерительной системы
Figure 7. Dynamic model form measuring system

Дифференциальное уравнение (4), соответствующее динамической модели изменения температуры $\theta(\tau)$ (рисунок 7), эквивалентное (2) имеет вид

$$T_n \cdot T_T \frac{d^2\theta}{d\tau^2} + (T_n + T_T) \frac{d\theta}{d\tau} + \theta = 1(\tau). \tag{4}$$

Постоянную времени термопары T_T определяли по ее кривой разгона (рисунок 8), аппроксимацией методом Симою [15, 16] в виде решения $\theta_1(\tau)$ дифференциального уравнения первого порядка с постоянными коэффициентами (5)

$$a \frac{d\theta}{d\tau} + \theta = 1(\tau). \tag{5}$$

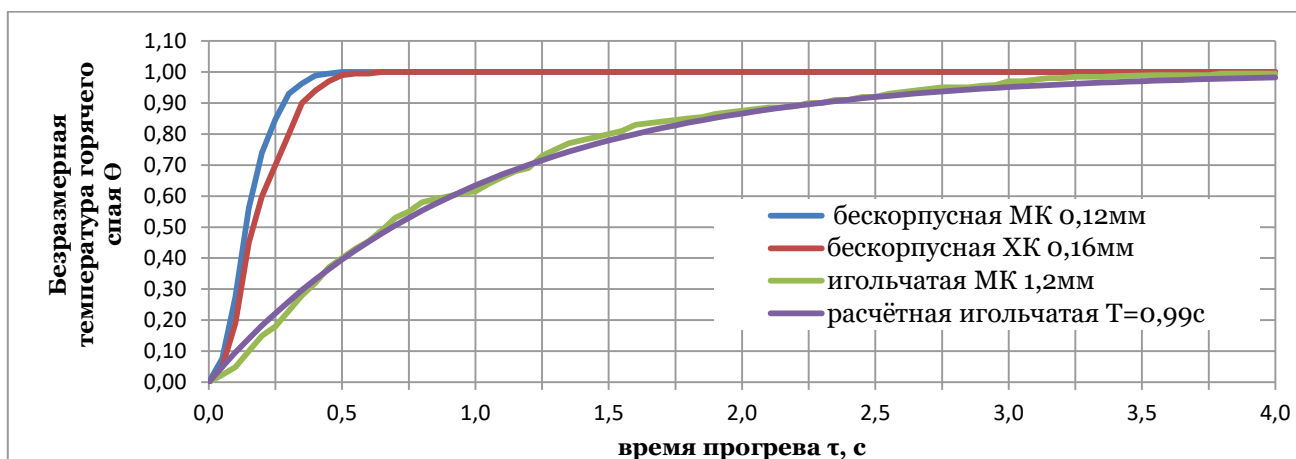


Рисунок 8 – Экспериментальные динамические характеристики бескорпусных термопар в стоячей жидкости: ХК \varnothing 0,16 мм, МК \varnothing 0,15 мм, игольчатой \varnothing 1,2 мм и расчетная кривая для постоянной времени термопары $T = 0,99$ с

Figure 8. Experimental dynamic characteristics of unpackaged thermocouples in stagnant liquid: chromel-copel thermocouple of 0.16 mm diameter, copper-constantan thermocouple of 0.15 mm diameter, needle thermocouple of 1.2 mm diameter and design curve for thermocouple time constant $T = 0.99$ s

Уравнение (5) соответствует передаточной функции термопар $W_T(s)$ (рисунок 9). Рассчитанное значение постоянной времени термопары МК $T_T = 0,1$ с. Зная значения a_1 , a_2 , и T_T найдены значения постоянных времени упаковок с продуктом без влияния динамики термопар из выражений $a_1 = (T_n \cdot T_T)$, $a_2 = (T_n + T_T)$.

Переходная функция данных температуры продукта $h(\tau)$, соответствующая решению дифференциального уравнения (4) при скачкообразном единичном входном воздействии по температуре среды в термостате $l(\tau)$, имеет вид [16]

$$h(\tau) = 1 - \frac{T_n}{T_n - T_r} \exp\left(-\frac{\tau}{T_n}\right) + \frac{T_r}{T_n - T_r} \exp\left(-\frac{\tau}{T_r}\right). \quad (6)$$

На рисунке 9 показаны расчетные графики безразмерной температуры прогрева продукта и термопары $h(\tau)$ (6) для рассчитанных значений их тепловой инерции, которые достаточно точно соответствуют экспериментальным данным прогревов.

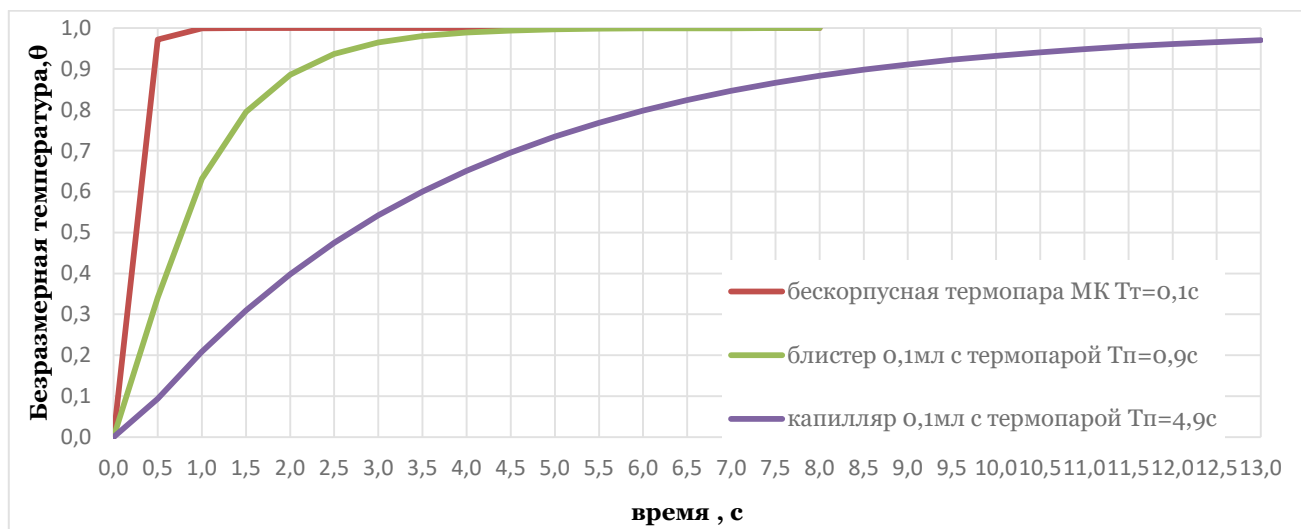


Рисунок 9 – Расчетные графики безразмерной температуры динамики термопары, капилляра, блистера 0,1 мл
 Figure 9. Design curves for non-dimensional temperature of dynamics for thermocouple, capillary, and blister of 0.1 ml

Продукт в капилляре прогревается от 40 до 120°C за $9 \div 10$ с [4, 6], что подтверждается и вышеуказанными данными (рисунок 2). Тепловая инерция для капилляров составляет ~ 12 с, диаметр для загрузки продукта $\leq 1,5$ мм, что не позволяет исследовать в них терморезистентность тм в реальных вязких и негомогенных продуктах [6] или с необходимым темпом прогрева для HTST $\frac{dt}{dt} \geq 20^\circ\text{C}\cdot\text{c}^{-1}$.

В связи с этим в дальнейших исследованиях использовали изготовленные из фольги блистеры, преимущество которых является большее чем в других устройствах отношение поверхности теплопередачи к объему продукта. Так для одинакового объема 0,33 мл в использованных капиллярах (рисунок 1) и блистерах $26 \times 26 \times 0,5$ мм (рисунок 3) отношение теплопередающих площадей к объему составляет для капилляров 16 см^{-1} , для блистеров 41 см^{-1} .

Показатель тепловой инерции нагреваемого тела при теплообмене от жидкости T (постоянную времени, обратную темпу прогрева) в теории тепловой инерции Кондратьева [12] связывают с физическими свойствами объекта прогрева и характером теплоотдачи от среды. К ним относят поверхность теплообмена F и объем V , безразмерный коэффициент формы ϕ , коэффициент теплоотдачи α от греющей среды к поверхности F капилляра, полной теплоемкостью C компонентов капилляра с плотностями $\rho C = \sum c \cdot \rho \cdot V$ которые входят в расчетную формулу (7)

$$T = \frac{C \cdot m}{\alpha \cdot F} \cdot \phi. \quad (7)$$

Для цилиндрического капилляра и подушкообразного блистера $\phi = 1$, а значение T соответствует регулярному режиму теплообмена [12].

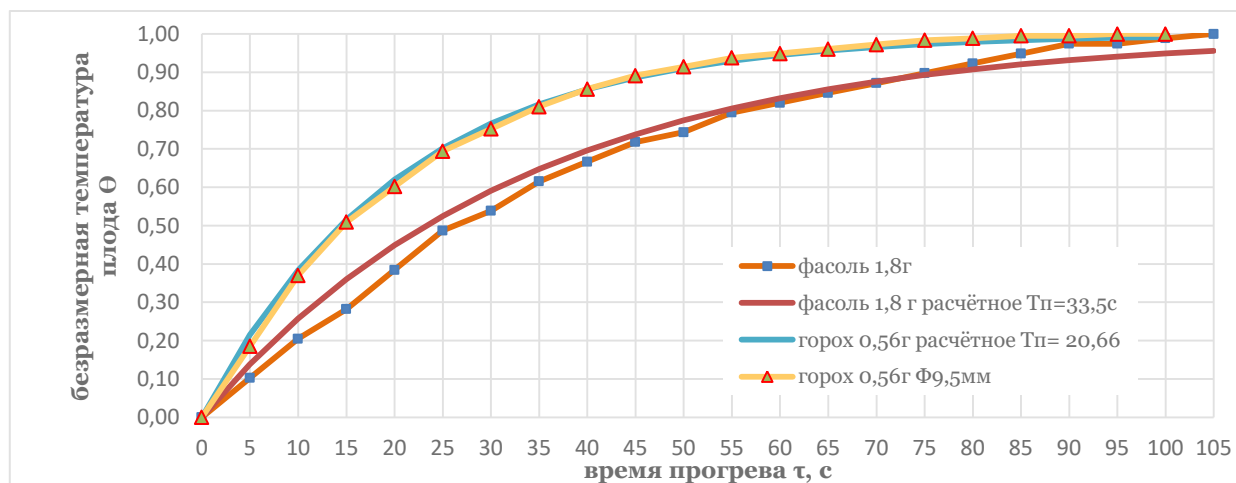


Рисунок 10 – Термограммы прогревов центра твердых компонентов консервируемых продуктов фасоли длиной 17–22 мм и массой 1,3 и 1,8 г – горошин диаметром ~ 9,5 мм массой 0,56 г
 Figure 10. Thermograms of come-up for the cores of solid parts in canned beans of 17–22 mm length and of 1.3 and 1.8 g mass – and peas of ~ 9.5 mm diameter and of 0.56 g mass

Как видно из графиков на рисунках 1, 4 и 10, в начале кривых роста температуры продукта наблюдается наибольшее различие экспериментальных и расчетных данных. Оно объясняется не только естественной погрешностью измерений, но главным образом тем, что вначале прогрев имеет иррегулярный характер [12] до установления регулярного теплового режима и одинакового темпа нагрева $T_{п}^{-1}$ во всех точках продукта. В связи с этим при аппроксимации кривых теплопроникновения в однородных телах как блистеры и капилляры с продуктом следует использовать данные температуры после установления регулярного теплового режима, в данном случае не ранее 0,5 с, при этом приближение расчетных значений к фактическим данным будет наилучшим.

Значения показателя тепловой инерции T , полученные аппроксимацией из экспериментальных данных различных исследованных объектов, приведены в таблице.

Таблица. Значения показателей тепловой инерции некоторых исследованных объектов
 Table. The values of thermal inertia for the objects under investigation

Наименование образца	Масса образца m , г	Показатель тепловой инерции T , с	Время $\tau_{0,99}$, с*
капилляр 0,1 мл яблочного сока с мякотью с термопарой	0,425	3,66	12
блистер с яблочным пюре 12% врсв с термопарой 0,5 мл	0,275	0,9	4,0
блистер с 0,5 мл пюре	0,875	4,9	17,5
бескорпусная термопара МК Ø 0,15 мм длина~110мм	0,017	0,1	0,5
игольчатая термопара МК Ø 1,2 мм длина погружной части 20 мм	–	0,99	3,5
фасоль бланшированная 22×10×11,2 мм	1,8	33,5	105
горох бланшированный Ø 9,5 мм	0,58	20,66	80

*Время прогрева образца до установления 0,99 безразмерной температуры, с.

Величину дозы теплового воздействия на популяцию тм определяют ее летальная температура и экспозиция воздействия, которая равна суммарному времени: CUT, экспозиции при температуре $t_{ст}$ и времени охлаждения тм от $t_{ст}$ до температуры ниже сублетальной. На графиках прогревов продуктов в капиллярах (рисунок 1) и в блистере (рисунок 4) CUT и время охлаждения от минимально летальной температуры 80°C, с которой начинают учитывать величину стерилизующего эффекта для спойлинговых микроорганизмов [8], до $t_{ст} = 120^{\circ}\text{C}$ составляет ~5 с, а экспозиции при $t_{ст} - 10$ с. Кривые нагрева и охлаждения в диапазоне 80° ÷ 120°C почти симметричны, поэтому в расчетах режимов величину инактивирующей дозы теплового воздействия следует увеличить на 12 с, что имеет большое значение для параметров HTST, ультрапастеризации, стерилизации в потоке при

асептическом консервировании. Для блистеров дополнительное время теплового воздействия составляет 4 с (рисунок 4 и 10).

Выводы

Получены динамические характеристики термопар, используемых при установлении и валидации режимов термической стерилизации продуктов при производстве консервов из фруктов, овощей и установлены границы их применения по критерию минимизации погрешности преобразования, в особенности для быстропротекающих термических процессов.

Бескорпусные термопары диаметром термоэлектродов $\leq 0,2$ мм не вносят заметных искажений в данные прогревов продукта в капиллярах и блистерах.

Предложены блистеры для изучения терморезистентности тест-микроорганизмов в продуктах при ультрапастеризации при температурах до 120°C с показателем тепловой инерции до 1 с. Термоинерционность блистеров при одинаковом с капилляром количестве продукта почти в три раза меньше.

Установлена необходимость учета продолжительностей нагрева и охлаждения исследуемых образцов при расчетах параметров кратковременных режимов стерилизации и ультрапастеризации.

Для повышения точности аппроксимации теплоинерционных объектов следует использовать данные только регулярного режима, исключая начальный вогнутый участок кривой прогрева.

Представленные результаты помогут в создании и развитии новой категории консервированных продуктов из фруктов и овощей – ультрапастеризованные.

Литература

1. Principles and guidelines for the conduct of microbiological risk assessment, CAC/GL 30-1999. *The Codex Alimentarius Commission*. The Food and Agriculture Organization of the United Nations, p.7.
2. Chung H.-J., Wang S.J., & Tang J.M. Influence of heat transfer with tube methods on measured thermal inactivation parameters for *Escherichia coli*. *Journal of Food Protection*. 2007, no. 70, pp. 851–859.
3. Валентас К.Дж., Ротштейн Э., Сингх Р.П. Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов / пер. с англ. под общ. науч. ред. А.Л. Ишевского. СПб.: Профессия, 2004. 848 с.
4. Mah J.-H., Kang D.-H., Tang J. Comparison of viability and heat resistance of *Clostridium sporogenes* stored at different temperatures. *Journal of Food Science*. 2009, V. 74, no. 1, pp. 23–27.
5. Peng J., Mah J.-H., Somavat R., Mohamed H., Sastry S., Tang J. Thermal inactivation kinetics of *Bacillus coagulans* spores in tomato juice. *Journal of Food Protection*. 2012, V. 75, no. 7, pp. 1236–1242.
6. Chung H.-J., Birla S.L., Tan J. Performance evaluation of aluminum test cell designed for determining the heat resistance of bacterial spores in foods. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*. 2008, pp.1351–1359.
7. Левшенко М.Т., Каневский Б.Л., Покудина Г.П., Борченкова Л.А. Изучение кинетики гибели спор *Clostridium Botulinum* при производстве гетерогенных консервированных продуктов // Наука, питание и здоровье: материалы конгресса (Минск, 8–9 июня 2017 г.). Минск: Беларуская наука, 2017. С. 431–438.
8. Бабарин В.П. Стерилизация консервов. СПб.: ГИОРД, 2006. 312 с.
9. Stumbo C.R. *Thermobacteriology in food processing*. Academic Press Inc., New York and London, 1973. 373 p.
10. Дэвид Д., Грейвз Р., Шемпленски Т. Асептическое производство пищевых продуктов. Переработка, фасование, розлив, упаковка. СПб.: Профессия, 2014. 292 с.
11. Code of hygienic practice for low and acidified low acid canned foods, CAC/RCP 23-1979. *The Codex Alimentarius Commission*. The Food and Agriculture Organization of the United Nations, Edition 1993. 85 p.
12. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении // Выдающиеся ученые университета ИТМО. СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2003. Вып. 9. С. 23–57.
13. Вейшторд И.П., Притыкина Л.А. (ред.) Сборник технологических инструкций по производству консервов. Т. 1. Консервы овощные и обеденные. М.: Пищевая промышленность, 1977. 480 с.
14. Ильгачев А.Н. Вычислительные аспекты метода площадей для параметрической идентификации объектов управления // Вестник Чувашского университета. 2010. № 3. С. 227–234.
15. Рутковский А.Л., Матвеева Л.И., Козачек Г.В. Оптимизация коэффициентов передаточной функции, полученной модифицированным методом Симою по экспериментально снятой переходной характеристике // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 3. С. 138–141.
16. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: Физматлит, 2007. 312 с.

References

1. Principles and guidelines for the conduct of microbiological risk assessment, CAC/GL 30-1999. *The Codex Alimentarius Commission*. The Food and Agriculture Organization of the United Nations, p.7.
2. Chung H.-J., Wang S.J., & Tang J.M. Influence of heat transfer with tube methods on measured thermal inactivation parameters for *Escherichia coli*. *Journal of Food Protection*. 2007, no. 70, pp. 851–859.
3. Valentas K.J., Rotstein E., Paul R. *Singh handbook of food engineering practice*. CRC Press, LLC, 1977, p. 698.
4. Mah J.-H., Kang D.-H., Tang J. Comparison of viability and heat resistance of *Clostridium sporogenes* stored at different temperatures. *Journal of Food Science*. 2009, V. 74, no. 1, pp. 23–27.
5. Peng J., Mah J.-H., Somavat R., Mohamed H., Sastry S., Tang J. Thermal inactivation kinetics of *Bacillus coagulans* spores in tomato juice. *Journal of Food Protection*. 2012, V. 75, no. 7, pp. 1236–1242.
6. Chung H.-J., Birla S.L., Tan J. Performance evaluation of aluminum test cell designed for determining the heat resistance of bacterial spores in foods. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*. 2008, pp.1351–1359.
7. Levshenko M.T., Kanevskii B.L., Pokudina G.P., Borchenkova L.A. Study of the kinetics of the death of spores of *Clostridium Botulinum* in the production of heterogeneous canned foods. *Science, Nutrition and Health. Proceeding of the Congress* (Minsk, June 8–9, 2017), Minsk, Belarusian science Publ., pp. 431–438.
8. Babarin V.P. *Sterilization of canned food*. St. Petersburg, GIOR Publ., 2006, p. 312. (In Russian).
9. Stumbo C.R. *Thermobacteriology in food processing*. Academic Press Inc., New York and London, 1973. 373 p.
10. David J., Graves R., Szemplenski T. *Handbook of aseptic processing and packaging*. 2nd Edition. CRC Press. 2013, p. 288.
11. Code of hygienic practice for low and acidified low acid canned foods, CAC/RCP 23-1979. *The Codex Alimentarius Commission*. The Food and Agriculture Organization of the United Nations, Edition 1993. 85 p.
12. Kondratiev G.M., Dulnev G.N., Platunov E.S., Yaryshev N.A. Applied Physics. Heat transfer in instrumentation. *Outstanding Scientists at ITMO University*. Is. 9, St. Petersburg, 2003, pp. 23–57 (In Russian).
13. Veyshtord I.P., Pritykina L.A. (ed.) Digest of technological instructions for the production of canned food. V. 1. *Canned vegetables and lunch*. Moscow, Food industry Publ., 1977, 430 p. (In Russian).
14. Ilgachev A.N. Computational aspects of the area method for parametric identification of control objects. *Bulletin of the Chuvash University*. 2010, no. 3. pp. 227–234 (In Russian).
15. Rutkovskij A.L., Matveeva L.I., Kozachek G.V. Optimization of factors of transmission function, got by modified method by Simoyu according to the experimental skim connection feature. *Herald of Voronezh State Technical University*. 2010, V. 6, no 3, pp. 138–141 (In Russian).
16. Kim D.P. Theory of automatic control. V. 1. *Linear control systems*. Moscow, Phyismathlit Publ., 2007. 312 p. (In Russian).

Статья поступила в редакцию 10.09.2019