

Научная статья

УДК 664.8.036.26

DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-2-53-67

## Научные основы режимов финишной стерилизации жидких консервируемых пищевых систем

В.И. Сенкевич

*Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования –  
филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН  
Видное, Московская обл., Россия, vnikop@gmail.com*

**Аннотация.** Исследовали режимы финишной термической стерилизации жидких пищевых продуктов с целью установления и валидации параметров процесса стерилизации, обеспечивающих безопасность консервов для потребителей. Изучали температуру стерилизуемого продукта в зонах упаковки при финишной термической стерилизации. Описаны применяемые в настоящее время прогнозные методы расчета режимов термической стерилизации при производстве консервированных жидких пищевых продуктов, основанные на парадигме определения фактической летальности наименее прогреваемой зоны при конвективном прогреве пищевых систем в упаковках. Показаны недостатки косвенных теплофизических расчетных методов установления и валидации режимов финишной стерилизации консервируемых продуктов. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса стерилизации жидких пищевых систем с различным содержанием водорастворимых сухих веществ в металлической и стеклянной банках (вода, яблочный сок, сахарный сироп). Определено влияние теплофизических свойств пищевых систем на характер изменения температуры продукта у дна банки, у стенки в пограничном слое, в верхнем слое продукта на середине радиуса банки и в центре наименее прогреваемой зоны при нагреве и охлаждении. Данные исследователей и собственных экспериментов указывают на циркуляцию жидкости в упаковках при стерилизации в течение значительной части фаз нагрева и охлаждения в исследованных зонах. Вместе с продуктом перемещается и распределенная в нем взвесь популяции целевых микроорганизмов в зоны с различной температурой, в том числе и наименее прогреваемую, что делает ничтожной оценку стерилизующего эффекта по летальности в какой-либо фиксированной зоне жидкости. При этом расположение наименее прогреваемой зоны не всегда совпадает с расположением застойной зоны в движущемся продукте. Предложено использование известного биологического метода установления режима стерилизации для всей партии стерилизуемой жидкой пищевой системы.

**Ключевые слова:** термическая стерилизация; наименее прогреваемая зона; теплопередача конвекцией; биологический метод

**Благодарность:** автор выражает глубокую признательность кандидату технических наук Владимиру Владимировичу Кондратенко за помощь и ценные замечания по основным положениям и структуре статьи

Original article

### Scientific basis for terminal sterilization of liquid canned food systems

Vyacheslav I. Senkevich

*Russian Research Institute of Canning Technology – Branch of V.M. Gorbатов Research Center for Food Systems of RAS  
Vidnoe, Moscow reg., Russian, vnikop@gmail.com*

**Abstract.** The article describes methods for determination canned food terminal sterilization modes to determine and validate the parameters of sterilization providing consumer safety. The temperature of the sterilized product in the packing zone at terminal sterilization was analyzed. The actual predictive techniques of calculation for the modes of thermal sterilization for canned liquid food are described. Those techniques are based on the paradigm of determining actual mortality in the slowest heating zone at convective heating of packaged food systems. The disadvantages of indirect thermophysical methods of calculation for determining and validation of canned food terminal sterilization modes are shown. The article demonstrates the experimental results for liquid food systems with various content of water-soluble dry matter in cans and jars (water, apple juice, and sugar syrup). The influence of food system thermophysical properties on the temperature dynamics at the bottom of the can/jar, near the wall in boundary layer, in the upper layer of the product at the middle of the radius, and at the center of the slowest heating zone at heating and cooling is determined. The data from the previous research as well as the data from our own experiments demonstrate the circulation of liquid in packages at sterilization during the considerable part of heating and cooling phases in the zones under investigation. At the same time, the population of spoilage microorganisms distributed in the product moves into the zones of various temperature including the slowest heating one, which makes the estimation of sterilizing effect in terms of its mortality at a particular zone of the

liquid insignificant. The location of the slowest heating zone does not coincide with the one of stationary zone in the product with convective flow. The safety of the sterilization regime for a liquid food system is suggested to be estimated by a well-known biological method.

**Keywords:** sterilization of liquid foods; the slowest heating zone; convective heat transfer; biological method

**Acknowledgments:** the author is deeply grateful to the Ph. D. Vladimir V. Kondratenko for help in structuring the research data

## Введение

Современный подход в установлении режимов финишной термической стерилизации пищевых систем включает расчеты поля температуры продукта  $T$  в упаковке по заданным граничным условиям процесса, идентификацию наименее прогреваемой зоны (англ. Slowest Heating Zone – SHZ) в этом поле. Валидация расчетных данных путем проведения пробной термообработки партии продукта в стерилизаторе с анализом промышленной стерильности этой партии по ГОСТ 30425-97 [1] позволяет скорректировать расчетные параметры режима стерилизации.

По результатам многочисленных проанализированных расчетов и экспериментальных исследований [2–6] установлено, что теплопередача герметично упакованных жидких пищевых систем (англ. Liquid Food System – LFS) в аппаратах стерилизации происходит преимущественно за счет естественной конвекции.

При первоначальных расчетах режимов стерилизации [7] считали, что при реальных перепадах температуры стерилизатора  $T_{st}$  и продукта  $T$ , во всем объеме продукта  $V$  преобладают конвекционные течения при однородности температуры  $T$  до и во время стерилизации в продукте  $\frac{\partial T}{\partial V} = 0$ .

В последующих исследованиях, особенно с применением расчетных методов вычислительной гидродинамики (англ. Computational Fluid Dynamics – CFD) [8–13], пришли к выводу, что при наличии конвекции в LFS следует различать характер температурного поля в упаковках в зависимости от реологических и теплофизических свойств пищевых систем, геометрии и расположения упаковки в стерилизаторе. Эти параметры влияют на локализацию и миграцию SHZ, а также на кумулятивную летальность  $F$  в ней за время стерилизации  $\tau$ , которую определяют по формуле

$$F = \int_0^{\tau} 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} d\tau \quad (\text{мин}), \quad (1)$$

где  $\tau$  – время стерилизации, мин;

$T_{ref}$  – референтная температура стерилизации продукта, °C;

$z$  – вариация температуры стерилизации, изменяющая летальность  $F$  в 10 раз, °C [1].

Результаты изучения возникновения и развития конвекции в неравномерно нагретой жидкости в ограниченном пространстве, приведены в [14]. Согласно выводам авторов, отсутствие конвективного движения LFS в стерилизуемой упаковке, вызванное ее внешним нагревом или охлаждением, наблюдают в процессе стерилизации при определенных внешних условиях теплопередачи. При этом теплообмен в LFS происходит преимущественно за счет теплопроводности. Изменение условий теплообмена может вызвать конвективное движение LFS у более нагретых поверхностей упаковки со скоростью  $\vec{V}$ , и всего ее объема  $V$ , в силу свойства сплошности LFS как несжимаемой жидкости, которое обозначают как  $\text{div}\vec{V} = 0$ .

Если возмущения тепловые и/или механические со временем затухают (например, при отсутствии значительного перепада температуры в стерилизаторе  $T_{st}$  и в упаковке  $T$ ), то тепловое и механическое равновесие LFS устойчиво. Если тепловые возмущения нарастают, то механическое равновесие нарушается и возникает свободная или естественная конвекция. Авторы отмечают, что наименьшее критическое значение числа Рэлея  $Ra_{кр}$  определяет порог конвекции во всех случаях, как при донном, так и боковом нагреве, что характерно как раз для стерилизации продукта в банках и полимерных упаковках [14].

Процесс естественной конвекции при нагреве LFS в упаковке при однородной начальной температуре в ней  $T_0$  начинается с теплопередачи от греющей среды с температурой  $T_{st}$ , теплопроводностью через пограничный слой жидкости  $b$ , у стенок, дна и крышки упаковки (банки) [10].

Это приводит к увеличению объема и соответствующему уменьшению плотности  $\rho(T)$  нагретых частей LFS у стенок при росте давления в герметичной упаковке и несжимаемости жидкости от роста давления по формуле

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot [1 - \beta \cdot (T - T_0)], \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – плотность LFS при температуре  $T_0$  °C, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения LFS, 1/К.

Нагретые элементы LFS с меньшей плотностью  $\rho(T)$  (2) всплывают, если подъемная сила  $F_A$  больше сил вязкого трения  $F_{fr}$  между слоями жидкости сильнее нагретыми у стенок и слабее в центре. Пограничный слой LFS поднимается до ее верхней поверхности и растекается по ней, еще более нагреваясь от паровоздушного пространства под крышкой упаковки (рисунки 1, 2, 11). Вследствие сплошности LFS, вытесненная у стенки вверх горячая LFS заменяется более холодной из нижней части ядра жидкостного цилиндра [7–9] как видно на рисунках 1, 2, 3, 11.

После прогрева LFS ее температура  $T \rightarrow T_{st}$ , значит и плотность  $\rho(T_{st})$  становится более однородной по объему и  $F_A$  уменьшается, скорость  $\vec{V}$  пограничного слоя LFS также уменьшается и ее окончательный нагрев почти до  $T_{st}$  происходит за счет теплопроводности.

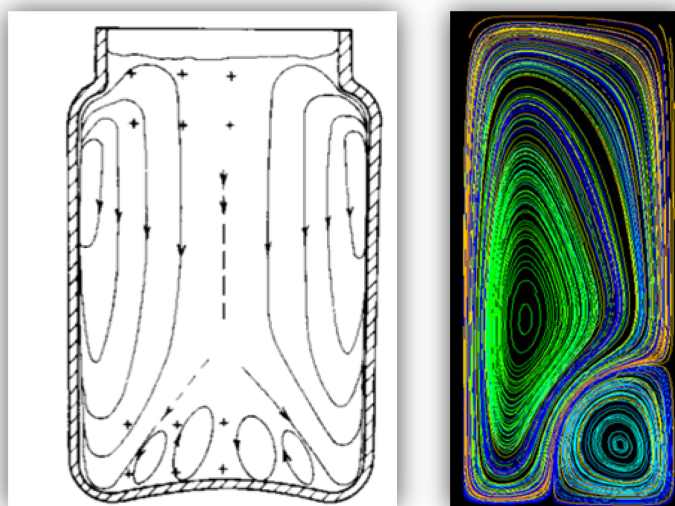


Рисунок 1 – Слева линии конвекционного тока и места расположения рабочих спаев термопар (показаны +) при стерилизации 1% раствора бентонита по данным [3]; справа линии тока 1% водного раствора натрий-карбоксиметилцеллюлозы (СМС) по данным [11]

Figure 1. Left – convection flow lines and thermocouple locations during sterilization of 1% bentonite solution according to the data from [3]; on right – aqueous solution of carboxymethyl cellulose CMC according to the data from [11]

Для начала и сохранения конвекции необходимо, чтобы модуль скорости  $\vec{V}$  всплытия горячего пограничного слоя LFS был больше темпа теплоотдачи от пограничного слоя к ядру продукта, имеющему меньшую температуру.

При измерении температуры 1% бентонитовой суспензии термопарами, закрепленными вдоль по вертикальной оси и в горизонтальной плоскости через геометрический центр банки (рисунок 1) обнаружили [5], что величина температуры уменьшается сверху вниз. В горизонтальной плоскости установлен значительный градиент температуры в пограничном слое, а в ядре профиль температуры был почти плоским со слабым минимумом в центре (рисунок 2).

Кроме того, в работе [3] показано, что для разной по плотности  $\rho$  LFS, например, когда водный слой находится поверх раствора сахарозы, в процессе нагрева обнаружили, что конвекционные потоки не пересекают границу между водой и раствором сахарозы. Различий плотности  $\rho$  воды и 7% сиропа при градиенте температуры 60°C между двумя компонентами в упаковке оказалось недостаточно, для конвекции этой смеси.

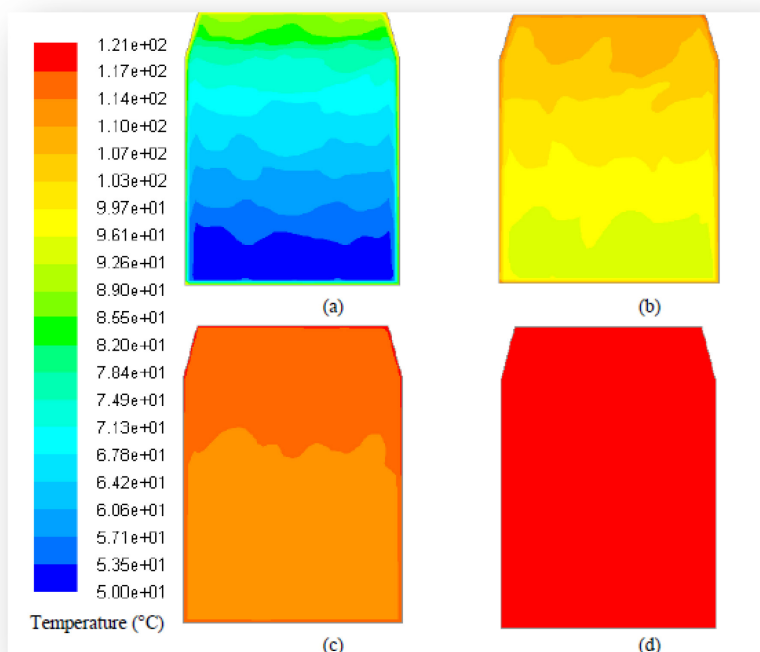


Рисунок 2 – Визуализация поля температуры молока при стерилизации в паровой среде при  $T_{st} = 121^{\circ}\text{C}$ :  
(a) – через 60 с, (b) – через 180 с, (c) – через 300 с, (d) – через 480 с [15]

Figure 2. Visualization of the milk temperature field during sterilization in steam at a temperature of  $121^{\circ}\text{C}$ :  
(a) – after 60 s, (b) – after 180 s, (c) – after 300 s, (d) – after 480 s [15]

По мнению Carrote and all. [5], в многокомпонентных LFS также не следует учитывать летальность  $F$  в SHZ как главный показатель стерильности из-за случайного характера теплопередачи, вызванного разной плотностью жидких компонентов.

В более вязких LFS, чем вода и осветленные фруктовые соки, процесс конвекции проходит менее интенсивно, хотя вязкость и плотность большинства LFS, как правило, экспоненциально снижается при повышении температуры [11].

В 1975 году J. Hidding [3] сделал вывод, что для конвекционного нагрева маловязких LFS теплоотдача от греющей среды к стенкам упаковки и их теплопроводность являются фактором, значительно уменьшающим интенсивность прогрета продукта в ней. В этой связи для продуктов с конвекционным теплообменом, в частности LFS, автор рекомендует использовать металлические упаковки, а нагрев упаковок конденсирующимся паром считает более эффективным, чем нагрев или паровоздушной смесью или водой.

При исследовании стерилизации молока в банках [15] в вертикальном положении температура молока по оси банки  $\text{Ø}62$  мм,  $h85$  мм в начальный период была меньше, чем в окружающих частях (рисунок 2а), поэтому авторы принимают эту зону у дна по оси за SHZ. В работе указано на существование восходящего потока молока в тепловом пограничном слое со скоростью  $\vec{V} = 4 \div 9 \cdot 10^{-3}$  м/с и опускающегося ко дну ядра конвекционного равномерного потока в центре банки, даже с добавлением 1,5% карбоксиметилцеллюлозы (англ. СМС).

Когда жидкие пищевые продукты подвергаются термической обработке, движение жидкости ускоряет термическую обработку за счет увеличения темпа теплообмена. Следовательно, теплопередача LFS в упаковке зависит как от изменения температуры, так и характера ее локальных токов, в том числе соков с мякотью (рисунок 4).



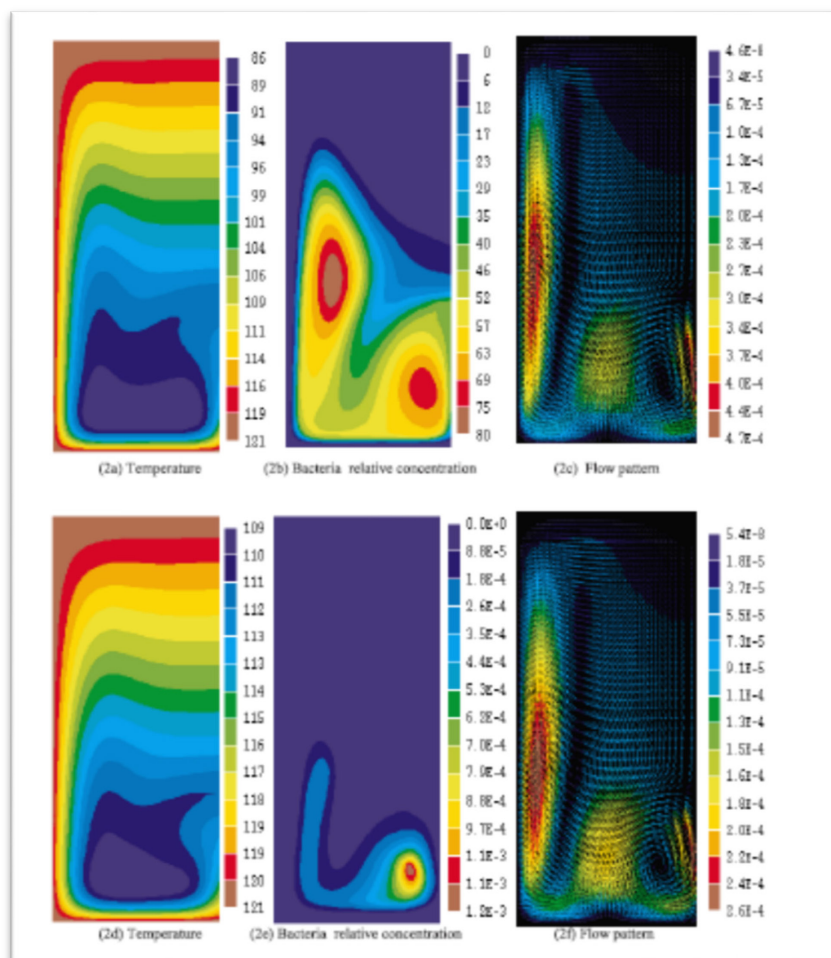


Рисунок 3 – Диаграммы полей в осевом сечении температуры (слева), концентрации микроорганизмов (в центре) и линий тока (справа) при нагреве 1% водного раствора СМС в алюминиевой банке Ø80 мм h110 мм при  $T_{st} = 121^{\circ}\text{C}$  Верхний ряд через 60 с, нижний через 120 с [21]

Figure 3. Field diagrams in the axial section of temperature (left), concentration of microorganisms (center) and streamlines (right) for heating 1% aqueous solution of CMC in an aluminum can. Top row is the fields after 60 s, bottom row – after 120 s [21]

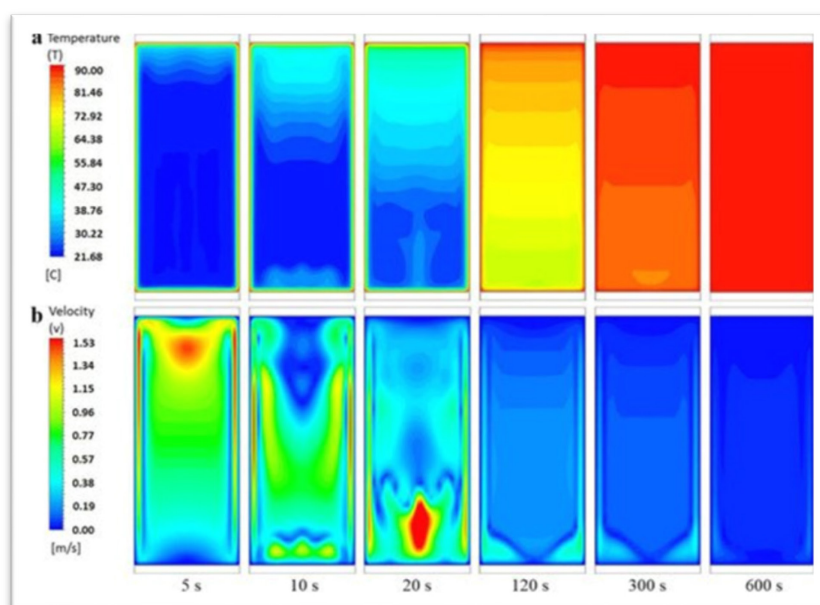


Рисунок 4 – Диаграммы температуры (a) и скорости конвективных течений (b) при нагреве до  $90^{\circ}\text{C}$  в цилиндрической банке через 5; 10; 20; 120; 300 и 600 с [9]

Figure 4. Temperature (a) and velocity profiles (b) for heating at  $90^{\circ}\text{C}$  in a cylindrical can at 5; 10; 20; 120; 300 and 600 s [9]

Из рисунка 4а видно, что начиная с 20 с SHZ локализована в нижней части объема LFS, а при температурах  $T > 70^{\circ}\text{C}$ , наиболее влияющих на термоинактивацию SHZ, находится уже у дна банки. После 120 с и по температуре  $T$  на рисунке 4а по скорости  $v$  на рисунке 4б характер прогрева LFS соответствует теплопроводности. При этом никаких конвекционных циркуляционных контуров LFS на рисунке 4б, начиная с 120 с, не показано и  $v \rightarrow 0$ .

Важный вывод, сделанный в работах [2–7] в том, что для LFS основной способ теплообмена – естественная конвекция. При этом пространство цилиндрических упаковок с продуктом можно условно разделить на три зоны по характеру линий тока. Центральное ядро потока с небольшой скоростью ламинарного потока движется вниз в течение всего периода нагрева (рисунок 2, 3). Изотермы почти параллельны горизонту (рисунки 2–4).

Другая зона – пограничный слой с относительно большей скоростью (для воды до 4 мм/с), движется вверх вдоль стенки, увеличиваясь в сечении  $\Delta$  от 1 мм у дна до 6 мм у поверхности. Характер потока ламинарный у дна с локонообразными завихрениями у верхней поверхности раздела (рисунок 12).

В третьей, придонной зоне LFS, возникают завихрения при перепаде температуры  $T_{st} - T \geq 60^{\circ}\text{C}$  только при интенсивном нагреве снизу и большой поверхности нагрева дна, когда  $d \geq h$ .

LFS в упаковке перемещаются во всем объеме в течение всего процесса нагрева до выравнивания температуры (рисунок 2–4), поэтому устанавливать эффективность стерилизации по данным термограмм в какой-либо точке или зоне, считая ее репрезентативной, не корректно.

На том же основании авторы [16] предлагают вместо теплофизических расчетов или экспериментального определения фактической летальности  $F$  использовать биологический метод установления интегральной летальности в пробной партии продукта, инокулированного спорами целевых микроорганизмов.

Другое биохимическое направление экспрессного количественного определения эффективности стерилизации – применение температурных биологических маркеров (англ. time-temperature integrators TTIs) [17]. С их помощью определяют экспозицию (англ. exposure time) и распределение температуры в упаковке или потоке в сочетании с кинетикой термоинактивации целевых микроорганизмов при термической стерилизации, а также в качестве индикатора безопасности и качества консервов. Авторы использовали для анализа режимов термообработки таких жидких пищевых продуктов с низкой вязкостью, как молоко и соки при температурах  $70\text{--}85^{\circ}\text{C}$  и экспозиции 10–60 с ферменты: пероксидазу, лактопероксидазу и щелочную фосфатазу и получили положительные результаты.

Альтернативный расчетным, биологический метод установления и валидации режимов термической стерилизации подробно описан в [1] и международном стандарте ISO 11138-1:2006. Этот метод используют на конечной стадии цикла установления режима стерилизации, в то время как расчетные методы на начальном этапе для предварительной оценки влияния тепловой обработки продукта на летальность целевых микроорганизмов.

Для режима стерилизации и его технической реализации для конкретного вида продукта и упаковки, устанавливаемого с помощью микробиологического метода, выполняют следующие стандартные процедуры по ISO 11138-1:

- ✓ определяют бионагрузку (контаминации) целевыми микроорганизмами в продуктах, упаковочных материалах перед стерилизацией по ИСО 11737-1;
- ✓ определяют промышленную стерильность по ИСО 11737-2;
- ✓ применяемые приборы и материалы должны обеспечить комбинацию параметров процесса с изменяемым стерилизующим эффектом, в том числе меньше, чем в процессе необходимой стерилизации, так чтобы уровень инактивации микроорганизмов при этом приводил к остаточной численности популяции, которая может быть интерполирована относительно необходимого конечного результата стерилизации.

В настоящее время проблема установления режимов термической стерилизации обсуждается в научной периодике и литературе по технологическим процессам пищевой промышленности и окончательно не решена. Необходимость ее решения вызвана большим разнообразием консервируемых LFS с различными теплофизическими свойствами и в разнообразных упаковках. Рассмотренные расчетные методы теплового режима стерилизации LFS по критерию величины летальности  $F$  продукта

в локализованной на основании расчетов SHZ дают неоднозначные результаты для установления режимов стерилизации.

Задачей настоящей работы является определение границ применения проанализированных современных методов исследования режимов термической стерилизации LFS при естественной конвекции в упаковках, уточнение параметров конвективного теплообмена, оценка эффективности летальности  $F$  как основного критерия микробиологической безопасности консервов и рекомендации метода установления режима финишной стерилизации LFS, обеспечивающего достаточную микробиологическую безопасность консервов.

## Материалы и методы

Для исследования поля температуры при стерилизации LFS использовали жестяную банку по ГОСТ 5981-2011 диаметром 64 мм высотой 68 мм с собственной массой 27 г, в которую дозировали 180 г LFS: воды, яблочного осветленного сока с содержанием 11% водорастворимых сухих веществ по рефрактометру и 20% водного раствора сахара. Начальная температура всех LFS  $T_o = 30^\circ\text{C}$ . Расположение рабочих спаев термопар в цилиндрической металлической банке с LFS показано на рисунке 5.

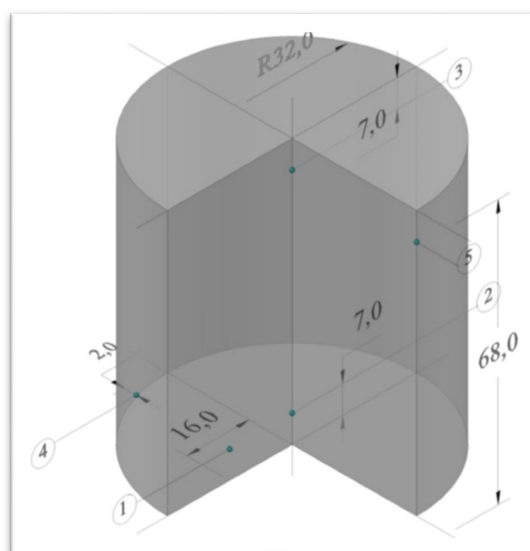


Рисунок 5 – Расположение пяти точек измерения температуры LFS и стенки в металлической банке при стерилизации

Figure 5. Location of five temperature measurement points in a metal can 190ml during sterilization

Термоэлектроды термопар типа  $L$  изготавливали из отожженных медной и константановой проволоки  $\varnothing 0,12$  мм, размер рабочего спая не больше 0,5 мм. После сварки рабочих спаев термоэлектроды выдерживали в 37% растворе  $\text{H}_2\text{O}_2$  для создания диэлектрической оксидной поверхности, покрывали термолаком для второго слоя электрической изоляции, проверяли соответствие нормированной статической характеристики для  $L$  типа по ГОСТ Р 8.585-2001 термостатированием при температурах  $20 \pm 0,1$  и  $90 \pm 0,1^\circ\text{C}$ .

Термопары вводили в банку через отверстия в стенке, фиксировали в заданных положениях (рисунок 5) и герметизировали места ввода термостойким эпоксидным герметиком. Для жесткости парных термоэлектродов в банке их соединяли между собой лаком. Соединительные концы термопар подключали к восьмиканальному термометру Ellab STF 9008, связанному через COM-порт с PC.

Термопарой 1 (рисунок 5) измеряли температуру LFS в половине радиуса банки на высоте 7 мм от дна, что составляет 10% $h$ . Такая высота расположения рабочих спаев термопар выбрана по аналогии с указанной в работах [7, 9] локализацией SHZ. Термопарой 2 измеряли температуру на оси банки на той же высоте. Термопарой 3 определяли температуру верхнего слоя LFS, где находится наиболее нагретая ее часть. Термопарой 4 измеряли температуру пограничного слоя в 2 мм от стенки на той же высоте, а термопара 5 была припаяна к внутренней стенке банки.

Интервал измерения каждого канала составлял 10 с, максимальная совокупная основная статическая погрешность системы измерения и регистрации температуры в зонах упаковки не превышала  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , а показатель тепловой инерции термопар в неподвижной жидкости 3 с по ГОСТ 8.009-84.

Подготовленную банку с термопарами заполняли исследуемой LFS на 90% объема и погружали в жидкостный термостат ВТ16 с предварительно нагретой до температуры  $95\text{--}98^{\circ}\text{C}$  дистиллированной водой. Погрешность  $T_{st} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . По прибору Ellab STF 9008 и РС контролировали и регистрировали температуру LFS в зонах металлической банки.

Для сравнения динамических характеристик теплообмена при стерилизации на графиках и в расчетах использовали общепринятый параметр – безразмерную температуру  $\theta$ , которую определяли как

$$\theta = \frac{T - T_{st}}{T_0 - T_{st}} \quad (3)$$

Термограммы безразмерной температуры  $\theta$  (3) прогревов трех LFS приведены на рисунках 6–8.

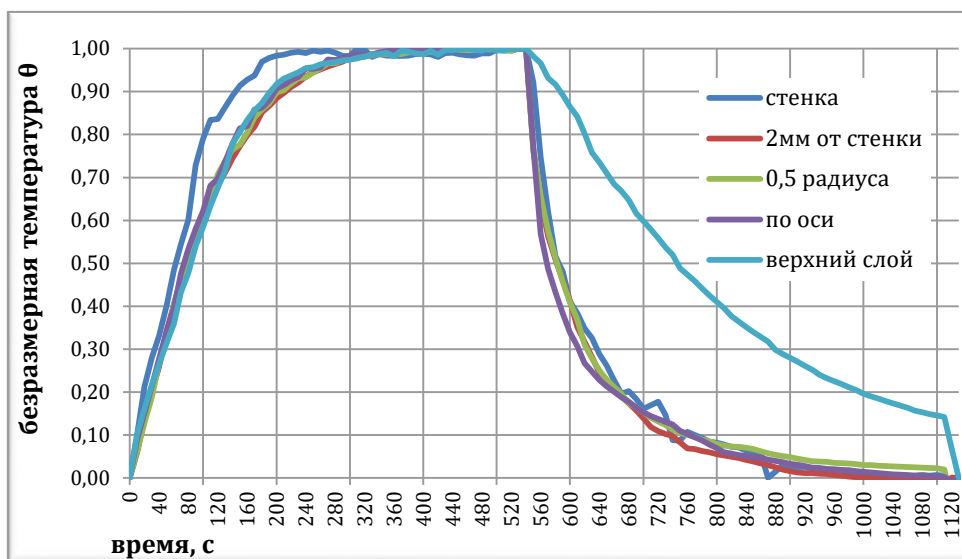


Рисунок 6 – Термограмма стерилизации 190 мл воды в металлической банке при  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{st} = 98^{\circ}\text{C}$  и охлаждения в воде с температурой  $20^{\circ}\text{C}$

Figure 6. Heating curves of water in a metal can at a temperature of  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{st} = 98^{\circ}\text{C}$  and cooling in cold water of  $20^{\circ}\text{C}$

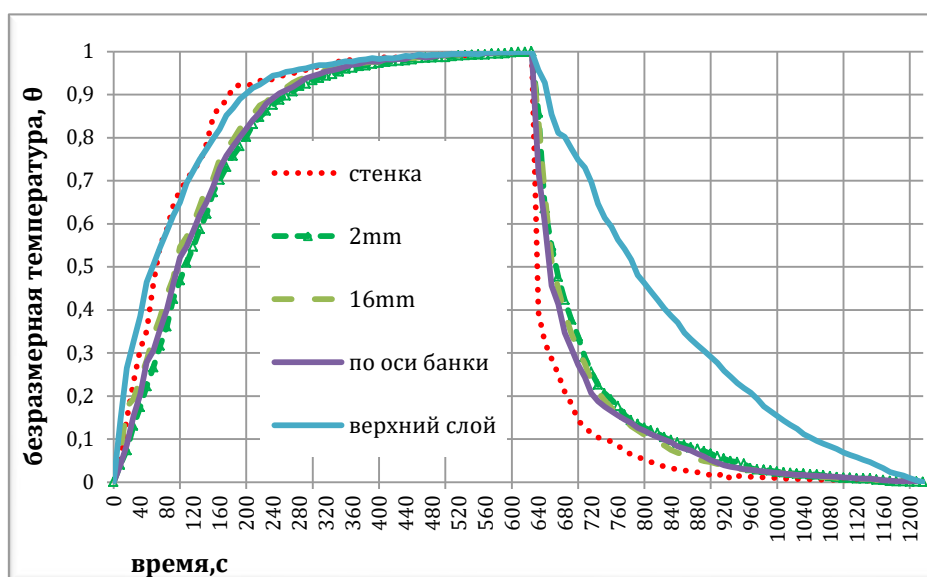


Рисунок 7 – Термограмма стерилизации сиропа 20% врсв при  $T_{st} = 98^{\circ}\text{C}$  и охлаждения банки в воде  $20^{\circ}\text{C}$   
 Figure 7. Heating curves of 20% Brix syrup in a metal can at a temperature of  $T_{st} = 98^{\circ}\text{C}$  and cooling in cold water of  $20^{\circ}\text{C}$



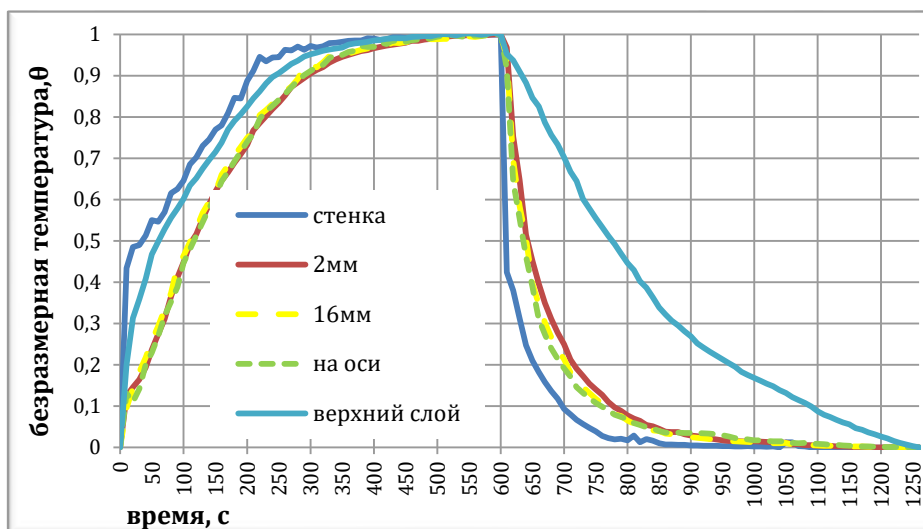


Рисунок 8 – Термограмма стерилизации осветленного яблочного сока в металлической банке 190 мл при  $T_{st} = 98^{\circ}\text{C}$  и охлаждении в воде  $20^{\circ}\text{C}$

Figure 8. Heating curves of clarified apple juice in a metal can at a temperature of  $T_{st} = 98^{\circ}\text{C}$  and cooling in cold water of  $20^{\circ}\text{C}$

Для сравнения температуры яблочного сока по высоте в нижней части LFS при стерилизации в металлической и стеклянной банках одинакового объема были проведены прогревы сока и в стеклянной банке. Вместимость банки (рисунок 11) 190 мл,  $\text{Ø}60$  мм,  $h = 94$  мм и собственная масса 124 г. В придонной части стеклянной банки граничные условия теплообмена отличаются от условий в металлической банке, т.к. в металлической банке толщина дна и стенок одинаковая – по 0,21 мм, а в стеклянной дно в 1,5 раза толще (рисунок 11). При этом коэффициент теплопроводности стекла 15 Вт/м·К, а у стали – 92 Вт/м·К. Температура  $T_{st} = 95^{\circ}\text{C}$ , начальная температура сока  $T_o = 30^{\circ}\text{C}$ , а использованные приборы описаны в [6]. Все прогревы в обоих видах упаковок выполнены в трех и четырехкратных повторностях. Термограммы средних значений температуры при прогревах осветленного яблочного сока в четырех точках по высоте на оси банки приведены на рисунке 9, а гомогенизированного яблочного сока с мякотью в трех точках на рисунке 10.

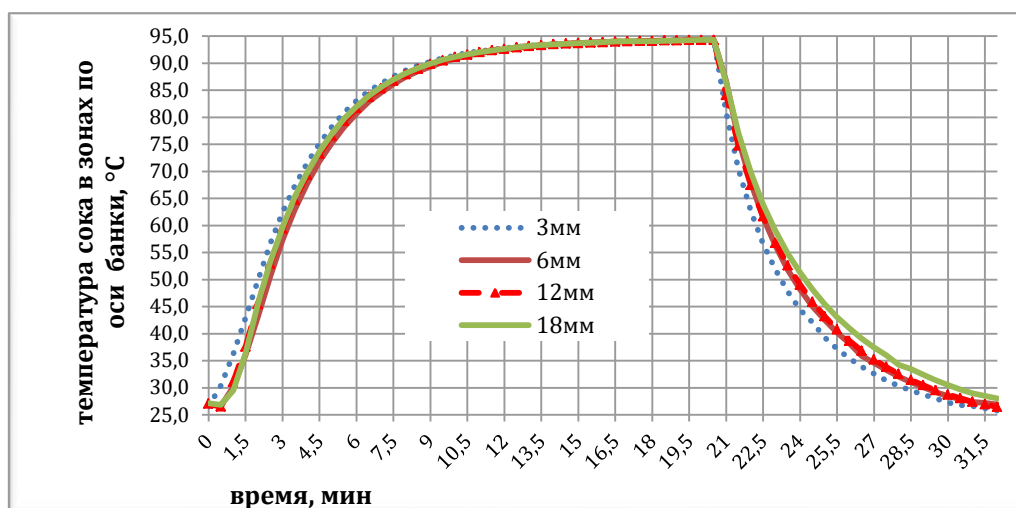


Рисунок 9 – Термограммы прогревов осветленного яблочного сока в стеклянной банке по ГОСТ 32671 вместимостью 190мл по оси банки на высоте 3; 6; 12; 18 мм от дна

Figure 9. Heating curves of clarified apple juice in a jar of 190 ml. Thermocouples for the height of 3; 6; 12; and 18 mm from the bottom

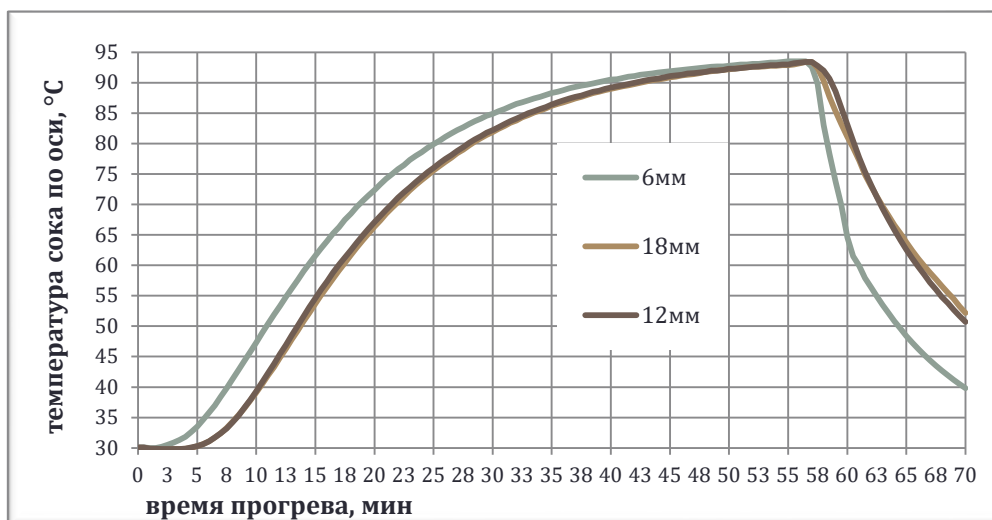


Рисунок 10 – Термограммы прогрева яблочного сока с мякотью в стеклянной банке по ГОСТ 32671 вместимостью 190 мл по оси банки на высоте 6; 12; 18 мм от дна

Figure 10. Heating curves of apple juice with pulp in a jar of 190 ml. Thermocouples for the height of 6; 12; and 18 mm from the bottom

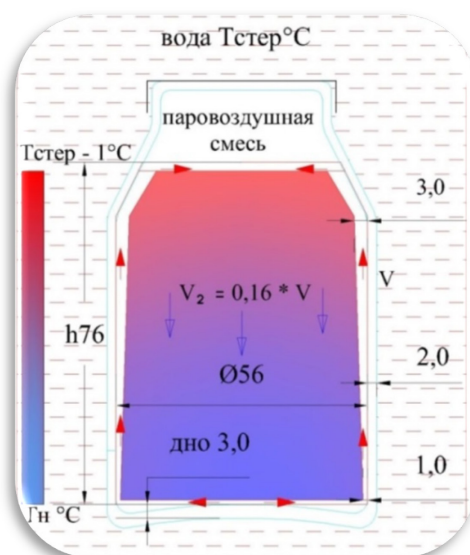


Рисунок 11 – Поле температуры яблочного сока и основные направления конвекционного потока при прогреве в термостате стеклянной банки по ГОСТ 32671 вместимостью нетто 190 мл. Нагрев банки при температуре в термостате 95°C

Figure 11. Temperature field and direction of convection flow for apple juice in a jar of 190 ml. Heating of the jar in a thermostat at a temperature of 95°C

## Результаты и обсуждение

Сравнение термограмм на рисунках 6–8 показывает, что быстрее всего в металлической банке прогревается верхний слой воды, сока и сиропа, и значительно медленнее, чем в других зонах остывает. Температура  $\theta_1$  внутренней стенки металлической банки (рисунки 6–8) не достигает моментально 1, а лишь через 3 мин для сока и воды и через 5 мин с сиропом. Однако в течение 10–20 с от начала нагрева и охлаждения  $\theta_1$  достигает величины 0,4 и затем медленно повышается до 1, что служит признаком начала термогравитационной конвекции в пограничном слое, при которой увеличивается теплоотдача от стенки банки к пограничному слою LFS, из-за чего темп изменения температуры  $\theta_1$  значительно снижается. Расчеты температурного поля и поля скоростей LFS выполнены в программах [7–13] при начальных условиях  $\forall t = 0 \mid \theta_1 = T_{st}$ . Они не учитывают указанного заметного отставания температуры стенки  $\theta_1$  от принятого в этих расчетах скачкообразного изменения температуры в начале нагрева и охлаждения и поэтому не совсем точно моделируют начальные и граничные условия теплообмена.

Температура осветленного яблочного сока и воды на высоте 10% банки на ее оси, и на расстояниях 2 и 16 мм от стенки при нагреве различаются между собой незначительно в сравнении с более вязким 20% сиропом (рисунок 7), в котором нагрев в зоне стенки и на половине радиуса опережает нагрев по оси на 3–8°C в течение первых 200 с. Полученные экспериментальные данные подтверждают характер расчетных температурных полей различных LFS на рисунках 2–4, на которых изотермы расположены примерно так же горизонтально по данным [7–10].

В тоже время, на расчетных диаграммах (рисунок 3) температуры и скорости потоков видно, что в разных зонах LFS при значениях ее температуры  $T \rightarrow T_{st}$  (левая диаграмма), при которых собственно проходит основной процесс термоинактивации спойлинговых и патогенных микроорганизмов, геометрически не совпадает с зонами минимальных скоростей движения конвективных потоков LFS и застойных зон (правая диаграмма).

Объемы LFS застойных зон на рисунки 2–4 по визуальной оценке площади составляют менее 8% объема упаковки.

Различный характер конвективного теплообмена одинаковых объемов одинаковой жидкости (осветленного яблочного сока) замечен при сравнении термограмм на рисунках 8 и 9: в металлической банке температура сока по оси на высоте 6–7 мм достигает значения  $T_{st} - 1^\circ\text{C}$  за 9 мин, а в стеклянной – за 16 мин. Гомогенизированный яблочный сок с мякотью такого же объема не достигает этой температуры и за 20 мин (рисунок 10).

Конвекция в LFS при термической стерилизации возникает тогда, когда влияние разности плотностей  $\rho$  нагретых и холодных частей системы больше влияния ее теплопроводности  $\lambda$  и вязкости  $\mu$ . Большая величина  $\lambda$  продукта приводит к однородности его температурного поля, значит к уменьшению подъемной силы, а большая  $\mu$  к увеличению вязкого трения между пограничным слоем и ядром LFS и торможению всплывающих элементов жидкости. Если горячий слой LFS всплывает быстрее, чем он остывает, передавая тепло более холодному ядру продукта в упаковке, то конвекция существует. Количественные показатели начала и развития термической конвекции за счет термогравитации, как уже указывалось, выражают числом Рэлея Ra. Значения Ra определяют по формуле

$$Ra = Pr \cdot Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{st} - T) \cdot b^3}{\nu \cdot a}, \tag{4}$$

где  $Pr = \frac{\nu}{a}$  – число Прандтля;

$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{st} - T) \cdot b^3}{\nu}$  – число Грасгофа;

$\nu$  – кинематическая вязкость LFS, м<sup>2</sup>/с;

$a$  – коэффициент температуропроводности LFS, м<sup>2</sup>/с;

$b$  – толщина всплывающего пограничного слоя LFS, м.

Результаты расчетов критического значения Ra, при котором начинается устойчивая термогравитационная конвекция в [6] показывают, что определяющее условие устойчивой конвекции:  $Ra \geq Ra_{кр}$  для горизонтального слоя жидкости между ограничивающими стенками  $Ra_{кр} \approx 1100$ , а при наличии свободной границы в упаковке, т.е. верхнего слоя жидкости значение  $Ra_{кр} \approx 657$ . Расчеты числа Ra для воды, яблочного сока и сахарного сиропа в условиях прогрева в использовавшихся упаковках приведены в таблице по формуле 4 для воды, осветленного яблочного сока и сахарного сиропа 20% врсв в зависимости от их температуры  $T$  при прогревах в металлической банке.

Таблица. Расчетные значения числа Рэлея – Ra для разных жидкостей  
Table. The value of Ra number for different liquids

Наименование жидкости	Температура нагреваемой жидкости T, °C				
	30	40	60	80	90
	число Ra · 10 <sup>-4</sup>				
вода	14,4	14,4	11,6	6,84	3,26
яблочный сок 11% врсв	2,89	2,75	1,9	1,21	0,64
сироп 20% врсв	0,87	0,62	0,43	0,37	0,31

В таблице приведены данные для температуры  $T_{st} = 98^{\circ}\text{C}$ , а число  $Pt$  рассчитано при температуре  $\frac{(T_{st} + T)}{2}$ . Толщина пограничного слоя LFS  $b = 2$  мм.

Расчетные значения  $Ra$  в таблице показывают наличие конвекции в воде и соке при всех значениях перепадов температуры  $T_{st} - T$  в упаковке, а значит и конвекционной миграции целевых микроорганизмов, а не сосредоточения их в SHZ. Водный 20% раствор сахара также нагревается конвекцией, когда  $T_{st} - T \geq 45^{\circ}\text{C}$  и  $Ra > Ra_{кр}$ . При  $T > 40^{\circ}\text{C}$  и  $T_{st} - T < 45^{\circ}\text{C}$  преобладает кондуктивный характер теплообмена, т.к.  $Ra = 310 < Ra_{кр}$ , что заметно по значительному уменьшению кривизны термограммы и увеличению времени прогрева по оси банки по сравнению с водой и соком в заключительной фазе нагрева (рисунок 7).

При толщине пограничного слоя  $b = 2-6$  мм и скорости в нем  $\vec{V} = 0,2-4$  мм/с, по данным [7-10], можно оценить подвижность ядра жидкости в упаковке при стерилизации. Для стеклянной и металлической банок  $V = 190$  мл с соответствующими диаметрами 56 и 64 мм и высотами 74 и 68 мм, режим течения пограничного слоя ламинарный, т.к. расчетное значение числа Рейнольдса в слое  $Re \approx 6$ . При  $b = 2$  мм средняя по сечению скорость ядра LFS в банках  $\vec{V}_2$  (рисунок 11): для стеклянной банки будет  $0,16 \cdot \vec{V}$ , для металлической  $0,138 \cdot \vec{V}$ . Если высота SHZ составляет 10%, т.е. 7,4 и 6,8 мм для указанных банок соответственно, то за время прогрева, например,  $\tau = 300$  с в SHZ стеклянной банки содержимое сменится 6 раз, а в металлической 5 раз.

Микробиологическая валидация расчетного режима и экспериментального прогрева с вычислением летальности  $F$  в SHZ, проведенная в [3], выявила большое расхождение между реальными значениями стерилизующего эффекта и полученными на модели. Эти результаты, по мнению автора, показывают, что использование расчетного и эмпирического теплофизического методов установления режима стерилизации, даже при небольшой разнице между температурой CFD и экспериментально определенной температурой в зоне продукта, приводит к значительному расхождению в инактивации микроорганизмов. Такие данные показывают необходимость оценки моделей CFD по температуре продукта при пробной стерилизации и микробиологическому методу.

Использование SHZ в качестве научной основы для оценки стерилизующего эффекта по величине  $F$  целесообразно для продуктов с точно локализованной SHZ и отсутствием подвижности всех частей продукта в процессе финишной термической стерилизации. Такие условия существуют в изотропных гомогенных продуктах с теплопроводным характером теплообмена без естественной и искусственной конвекции – пюреобразных консервах детского питания, овощной икре, джемах, повидло, томатной пасте с содержанием врсв  $\geq 30\%$  и т.п.

В изотропных LFS авторы [18] с большой вероятностью считают равномерной локализацию популяции целевых микроорганизмов, в связи с чем утверждают, что летальность в наименее прогреваемой точке упаковки LFS не следует использовать для оценки режима стерилизации.

При вращении упаковок с LFS, применяемой для интенсификации термической обработки в стерилизаторах, их содержимое принудительно и интенсивно перемешивают даже при значительной вязкости таких LFS, как томат-паста, пюреобразные консервы, обеденные блюда [19], так что при этом, по мнению авторов, исключается влияние наличия и локализации SHZ на режим стерилизации.

Большая вариативность приведенных данных о миграции микробной популяции вместе с продуктом в процессе термообработки и неопределенность размеров SHZ, температуры в ней и ее локализации свидетельствует о феноменологическом характере расчетного метода, данные которого нельзя экстраполировать и распространять на LFS, отличные от примененных в расчетах при изменениях их геометрии и расположения в пространстве стерилизатора, например, для прямоугольных пакетов, банок, имеющих другое отношение  $\varnothing/h$ .

При количественной оценке режима стерилизации по летальности  $F$  в SHZ, определяемой по (1), неизбежна значительная вариация летальности  $F$  из-за ее показательной функциональной зависимости от температуры  $T$  [1, 20]. Так для  $z = 8$  мин и  $T_{ref} = 121,1^{\circ}\text{C}$  при колебаниях температуры стерилизации  $T = 120 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$  величина  $F$  изменяется на +20% при температуре  $T = 120,1^{\circ}\text{C}$  и -25% при  $T = 119,9^{\circ}\text{C}$ . Такие незначительные колебания температуры  $T$  на  $\pm 0,08\%$  будут не замечены даже весьма точными приборами, используемыми для контроля  $T$ , а значение летальности  $F$ , которое



принято в качестве главного параметра стерильности, будет при этом меняться на четверть номинальной величины.

## Заключение

Миграция целевых микроорганизмов в упаковках при финишной термической стерилизации жидких пищевых систем за счет их естественной термогравитационной конвекции вместе с продуктом делает установление режима стерилизации по летальности таких продуктов в наименее прогреваемой точке или зоне продукта в упаковке не вполне обоснованным. Кроме того, она недостаточно учитывает биохимические особенности реакции термоинактивации микроорганизмов при стерилизации.

Научной основой установления режимов финишной термической стерилизации жидких пищевых систем, обеспечивающей их микробиологическую безопасность для потребителей, может служить биологический метод, включающий количественный микробиологический анализ результата пробной стерилизации целевых микроорганизмов продукта, соответствующих по составу и количеству их популяции во всем объеме производства данной жидкой пищевой системы. Биологический метод валидации режимов стерилизации также служит арбитражным для окончательного вывода о качестве и безопасности консервов. В тоже время следует провести корректировку биохимических оснований термоинактивации и математической обработки результатов микробиологических исследований на современном научном уровне, для постулирования безукоризненной научной основы режимов финишной и асептической стерилизации консервируемых пищевых продуктов.

## Литература

1. Бабарин В.П. Стерилизация консервов. Справочник. М.: Гиорд, 2006. 312 с.
2. Zechman L., Pflug I.J. Location of the slowest heating zone for natural-convection-heating fluids in metal containers. *Journal of Food Science*. 1989, V. 54, Is. 1, pp. 205–209.
3. Hiddink J. *Natural convection heating of liquids with reference to sterilization of canned food*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. 1975, 145 p.
4. Pokudina G.P., Trishkanova M.V., Volkova R.A. Development of pasteurization modes of high-sugar cans in continuous acting pasteurizers. *Food Systems*. 2019, V. 2, no. 4, pp. 48–52.
5. Garrote R.L., Silva E.R., Roa R.D., Ayala M. Determining convective heat transfer coefficient during sterilization of canned evaporative whole milk. *LWT – Food Science and Technology*. 2010, V. 43, pp. 724–728.
6. Кондратенко В.В., Борченкова Л.А., Покудина Г.П., Каневский Б.Л., Сенкевич В.И. Исследование миграции зоны наименьшего прогревания сока яблочного осветленного в процессе тепловой обработки // Вестник Воронежского государственного университета. 2020. № 1. С. 88–95.
7. Бардах Е.Я. Построение кривых изменений температуры продукта в банках при стерилизации // Консервная промышленность. 1936. № 6. С. 29–32.
8. Varma M.N., Kannan A. CFD studies on natural convective heating of canned food in conical and cylindrical containers. *Journal of Food Engineering*. 2006, no. 77, pp. 1024–1036.
9. Younis O., Pallares J., Grau F.X. Numerical study of transient laminar natural convection cooling of high Prandtl number fluids in a cubical cavity: Influence of the Prandtl number. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2007, no. 36, pp. 116–121.
10. Datta A.K., Teixeira A.A. Numerically predicted transient temperature and velocity profile during natural convection heating of canned liquid foods. *Journal of Food Science*. 1988, V. 53, Is. 1, pp. 191–195.
11. Abdul Ghani A.G., Farid M.M., Chen X.D., Richards P. An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food during sterilization using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Food Engineering*. 1999, no. 42, pp. 207–214.
12. Augusto P.E.D., Cristianini M. Computational fluid dynamics evaluation of liquid food thermal process in a brick shaped package. *Ciênc. Tecnol. Aliment*. 2012, V. 32, Is. 1, pp. 134–141.
13. Kızıldağ S., Erdogdu F., Palazoğlu T.K. Simulation of heat transfer for solid–liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions. *Journal of Food Engineering*. 2010, V. 97, Is. 4, pp. 449–456.
14. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
15. Prateek D., Chhanwal N., Anandharamkrishnan C. Heat transfer analysis of sterilization of canned milk using computational fluid dynamics simulations. *Journal of Food Science and Engineering*. 2013, V. 3, pp. 571–583.
16. Голод Б.И., Веселер З.И., Богданова Н.В., Леинсон И.Н. Разработка режимов стерилизации консервов, прогреваемых за счет теплопроводности без использования термопар // Консервная, овощесушильная, пищевая концентратная и табачная промышленность: сб. тр. Вып. 1. М.: АгроНИИТЭИПП, 1996. С. 6–10.

17. Aguiar H.F., Yamashita A.S., Gut J.A.W. Development of enzymic time-temperature integrators with rapid detection for evaluation of continuous HTST pasteurization processes. *LWT – Food Science and Technology*. 2012, no. 47, pp. 110–116.
18. Левшенко М.Т., Каневский Б.Л. Оптимизация расчета требуемой летальности при разработке режимов стерилизации и пастеризации гомогенных фруктовых консервов // Актуальные вопросы индустрии напитков. 2018. № 2. С. 81–86.
19. Демирова А.Ф., Мурадова М.С. Изучение прогреваемости модельного раствора при различных состояниях банки. Хранение и переработка сельхозсырья. 2000. № 8, С. 69–72.
20. Сенкевич В.И. Методы и параметры определения режимов стерилизации при производстве консервов // Аллея науки. 2018. Т. 2. № 9. С. 295–302.
21. Abdul Ghani A.G., Farid M.M., Chen X.D., Richards P. An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food during sterilization using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Food Engineering*. 1999, V. 42, pp. 207–214.

## References

1. Babarin V.P. Sterilization of canned food. Moscow, Giord Publ., 2006. 312 p. (In Russian)
2. Zechman L., Pflug I.J. Location of the slowest heating zone for natural-convection-heating fluids in metal containers. *Journal of Food Science*. 1989, V. 54, Is. 1, pp. 205–209.
3. Hiddink J. *Natural convection heating of liquids with reference to sterilization of canned food*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. 1975, 145 p.
4. Pokudina G.P., Trishkanova M.V., Volkova R.A. Development of pasteurization modes of high-sugar cans in continuous acting pasteurizers. *Food Systems*. 2019, V. 2, no. 4, pp. 48–52.
5. Garrote R.L., Silva E.R., Roa R.D., Ayala M. Determining convective heat transfer coefficient during sterilization of canned evaporative whole milk. *LWT – Food Science and Technology*. 2010, V. 43, pp. 724–728.
6. Kondratenko V.V., Borchenkova L.A., Pokudina G.P., Kanevskij B.L., Senkevich V.I. Investigation of the migration of the least heating zone of clarified apple juice during heat treatment. *Herald of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020, no. 1, pp. 88–95. (In Russian)
7. Bardah E.Ya. Temperature curves of the canned food during sterilization. *Canning Industry*. 1936, no. 6, pp. 29–32. (In Russian)
8. Varma M.N., Kannan A. CFD studies on natural convective heating of canned food in conical and cylindrical containers. *Journal of Food Engineering*. 2006, no. 77, pp. 1024–1036.
9. Younis O., Pallares J., Grau F.X. Numerical study of transient laminar natural convection cooling of high Prandtl number fluids in a cubical cavity: Influence of the Prandtl number. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2007, no. 36, pp. 116–121.
10. Datta A.K., Teixeira A.A. Numerically predicted transient temperature and velocity profile during natural convection heating of canned liquid foods. *Journal of Food Science*. 1988, V. 53, Is. 1, pp. 191–195.
11. Abdul Ghani A.G., Farid M.M., Chen X.D., Richards P. An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food during sterilization using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Food Engineering*. 1999, no. 42, pp. 207–214.
12. Augusto P.E.D., Cristianini M. Computational fluid dynamics evaluation of liquid food thermal process in a brick shaped package. *Ciênc. Tecnol. Aliment*. 2012, V. 32, Is. 1, pp. 134–141.
13. Kızıldağ S., Erdogdu F., Palazoğlu T.K. Simulation of heat transfer for solid–liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions. *Journal of Food Engineering*. 2010, V. 97, Is. 4, pp. 449–456.
14. Gershuni G.Z., Zhuhovickij E.M. Convective stability of incompressible fluids. Moscow, Nauka Publ., 1972. 392 p. (In Russian)
15. Prateek D., Chhanwal N., Anandharamkrishnan C. Heat transfer analysis of sterilization of canned milk using computational fluid dynamics simulations. *Journal of Food Science and Engineering*. 2013, V. 3, pp. 571–583.
16. Golod B.I., Veseler Z.I., Bogdanova N.V., Leinson I.N. Development of canned food sterilization modes without thermocouples. *Canning and Food Concentrate Industry*. Is. 1. Moscow, AgroNIITEIPP Publ., 1996, pp. 6–10. (In Russian)
17. Aguiar H.F., Yamashita A.S., Gut J.A.W. Development of enzymic time-temperature integrators with rapid detection for evaluation of continuous HTST pasteurization processes. *LWT – Food Science and Technology*. 2012, no. 47, pp. 110–116.
18. Levshenko M.T., Kanevskij B.L. Optimization of letality calculation during sterilization of canned food. *Aktual'nye voprosy industrii napitkov*. 2018, V. 2, pp. 81–86. (In Russian)
19. Demirova A.F., Muradova M.S. Study of heating model fluids. *Storage and Processing of Farm Products*. 2000, no. 8, pp.69–72.

20. Senkevich V.I. Methods for calculating the modes of sterilization of canned food. *Alley of Science*. 2018, V. 2, no. 9, pp. 295–302. (*In Russian*)
22. Abdul Ghani A.G., Farid M.M., Chen X.D., Richards P. An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food during sterilization using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Food Engineering*. 1999, V. 42, pp. 207–214.

#### *Информация об авторе*

Вячеслав Иванович Сенкевич – старший научный сотрудник

#### *Information about the author*

Vyacheslav I. Senkevich, Senior researcher

*Статья поступила в редакцию 27.04.2021*

*Одобрена после рецензирования 31.05.2021*

*Принята к публикации 10.06.2021*

*The article was submitted 27.04.2021*

*Approved after reviewing 31.05.2021*

*Accepted for publication 10.06.2021*