

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2470>  
<https://elibrary.ru/YJAMGO>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Влияние миграции зоны наименьшего прогревания на кинетику теплофизических процессов пищевых систем



**В. В. Кондратенко**<sup>ORCID</sup>, **Н. Е. Посокина\***<sup>ORCID</sup>, **А. И. Захарова**<sup>ORCID</sup>,  
**А. А. Королев**<sup>ORCID</sup>, **Г. П. Покудина**<sup>ORCID</sup>

Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования<sup>ROR</sup>, Видное, Россия

Поступила в редакцию: 20.09.2022  
Принята после рецензирования: 14.04.2023  
Принята к публикации: 02.05.2023

\*Н. Е. Посокина: [labtech45@yandex.ru](mailto:labtech45@yandex.ru),  
<https://orcid.org/0000-0002-7857-6785>  
В. В. Кондратенко: <https://orcid.org/0000-0002-0913-5644>  
А. И. Захарова: <https://orcid.org/0000-0002-2336-1816>  
А. А. Королев: <https://orcid.org/0000-0002-7144-2522>  
Г. П. Покудина: <https://orcid.org/0000-0002-5692-7839>

© В. В. Кондратенко, Н. Е. Посокина,  
А. И. Захарова, А. А. Королев, Г. П. Покудина, 2023



### Аннотация.

Миграция зоны наименьшего прогревания (англ. Slowest Heating Zone, SHZ) для пищевых систем с конвективным и преимущественно конвективным теплообменом позволяет сделать предположение о том, что в случае следования термопары за миграцией этой зоны летальность процесса будет отличаться от значения, рассчитанного исходя из фиксированного местоположения термопары. Возникает необходимость учета миграции SHZ при определении режимов тепловой обработки пищевых систем. Работа посвящена исследованию наличия статистически значимого отличия летальностей для фиксированной и мигрирующей SHZ в различных пищевых системах.

В качестве объектов исследования использовали четыре гомофазные и гетерофазные модельные пищевые системы. Изменение температуры отслеживали с помощью многоканальной системы E-ValPro и датчиков температуры SSA-TS. Датчики температуры располагали внутри банки с пищевой системой, фиксируя их на определенной высоте.

Анализ данных показал отсутствие значимой разницы летальностей на всей исследованной области определения температур стерилизации для модельной системы FS1. В отношении остальных модельных систем можно говорить о наличии интервалов температур стерилизации, на которых разницы летальностей статистически существенна. Несмотря на наличие интервалов температур, которым соответствуют статистически значимые разности летальностей для модельных систем FS2, FS3 и FS4, для первых двух систем величина данной разницы мала. Наибольшая разность на всем диапазоне варьирования соответствует модельной системе FS4, что связано с влиянием вовлекаемой в конвективный поток дисперсной фазой.

Статистически значимое отличие летальностей для фиксированной и мигрирующей SHZ имеет место только в гетерофазных пищевых системах с конвективным и преимущественно конвективным теплообменом с вовлекаемой в конвекционный поток дисперсной фазой. Данный факт необходимо учитывать при разработке режимов термической обработки указанных пищевых систем.

**Ключевые слова.** Зона, прогрев, кинетика, летальность, теплофизические процессы, режимы, термическая обработка

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках реализации плана фундаментальных исследований по теме FNEN-2019-00011.

**Для цитирования:** Влияние миграции зоны наименьшего прогревания на кинетику теплофизических процессов пищевых систем / В. В. Кондратенко [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 4. С. 731–741. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2470>

## Effect of the Slowest Heating Zone Movement on Thermophysical Kinetics in Food Systems



Vladimir V. Kondratenko<sup>ORCID</sup>, Natalia E. Posokina\*<sup>ORCID</sup>,  
Anna I. Zakharova<sup>ORCID</sup>, Aleksei A. Korolev<sup>ORCID</sup>, Galina P. Pokudina<sup>ORCID</sup>

All-Russian Research Institute of Canning Technology<sup>ORCID</sup>, Vidnoe, Russia

Received: 20.09.2022  
Revised: 14.04.2023  
Accepted: 02.05.2023

\*Natalia E. Posokina: [labtech45@yandex.ru](mailto:labtech45@yandex.ru),  
<https://orcid.org/0000-0002-7857-6785>  
Vladimir V. Kondratenko: <https://orcid.org/0000-0002-0913-5644>  
Anna I. Zakharova: <https://orcid.org/0000-0002-2336-1816>  
Aleksei A. Korolev: <https://orcid.org/0000-0002-7144-2522>  
Galina P. Pokudina: <https://orcid.org/0000-0002-5692-7839>

© V.V. Kondratenko, N.E. Posokina, A.I. Zakharova,  
A.A. Korolev, G.P. Pokudina, 2023



### Abstract.

The slowest heating zone tends to move about in food systems with convective and predominantly convective heat transfer. If the thermocouple follows the movement, the process lethality differs from the value precalculated for a fixed thermocouple location. Hence, the heat treatment modes depend on the movement of the slowest heating zone, which should be taken into account before planning food system processes. This research aimed at identifying a statistically significant difference between lethality for fixed and moving slowest heating zones in various food systems.

The study involved four homophasic and heterophasic model food systems. Food System 1 was heterophase, with a dispersed phase not involved in convection and a liquid dispersion medium of aqueous solution with 1.5% sucrose and 1.5% NaCl. Food System 2 was heterophase, with a dispersed phase not involved in convection and a liquid dispersion medium of 11% aqueous sucrose solution. Food System 3 was represented by homophase reconstituted clarified baby-food apple juice with 11.2% soluble solids. Food System 4 was a heterophase model system, represented by reconstituted baby-food apple juice with pulp and 11.2% soluble solids with a dispersed phase involved in convection. The temperature changes were monitored using the E-ValPro multichannel system and the SSA-TS model temperature sensors. The temperature sensors were fixed inside the jar with the food system.

Food System 1 showed no significant differences in lethality. Other model systems had sterilization temperature intervals when the difference in lethality was statistically significant. However, this difference was very small for Food Systems 2 and 3. The largest difference belonged to Food System 4, where the dispersed phase was involved in the convective flow.

In this research, a statistically significant difference in lethality for fixed and moving slowest heating zones occurred only in heterophase food systems with convective and predominantly convective heat exchange, where the dispersed phase was involved in the convection flow. This fact must be taken into account when identifying heat treatment modes for such food systems.

**Keywords.** Zone, heating, kinetics, lethality, thermophysical processes, modes, heat treatment

**Funding.** The work was part of fundamental research on topic FNEN-2019-00011.

**For citation:** Kondratenko VV, Posokina NE, Zakharova AI, Korolev AA, Pokudina GP. Effect of the Slowest Heating Zone Movement on Thermophysical Kinetics in Food Systems. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(4):731–741. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2470>

### Введение

Теплофизические процессы пищевых систем изучаются давно. Успешными являются исследования, которые касаются термической обработки твердых пищевых продуктов, т. к. для моделирования использовалась классическая модель теплообмена, базирующаяся на эффективном коэффициенте теплопроводности. В отличие от твердых продуктов

идентификация в зоне наименьшего прогревания (Slowest Heating Zone, SHZ) для жидких пищевых систем считается сложной задачей. Когда жидкие пищевые продукты подвергаются термической обработке, то движение жидкости ускоряет термическую обработку за счет увеличения скорости теплопередачи [1]. Целесообразность учета миграции SHZ в процессе тепловой обработки для определения

режимов стерилизации в таких системах отсутствует если теплопередача жидкости может регулироваться не только изменением температур, но и движением жидкости [2].

На рисунке 1 показано наличие конвекции при термической обработке жидких пищевых продуктов с помощью CFD-моделирования при условии зависимости движения жидкости от гидростатической силы. На начальном этапе жидкость у стенки находится в состоянии покоя. Как только внешняя стенка нагревается, то нагревается жидкость у стенки за счет теплопроводности (почти до температуры стенки) пока жидкость в центре ёмкости все еще имеет начальную температуру. В процессе термической обработки гидростатическая сила подавляется силой вязкого трения. Поле скорости конвективного потока зависит от соотношения сил: сопротивления потоку вязкости жидкости и гидростатической силы. Вязкость, которая зависит от температуры, уменьшается в процессе нагрева, что приводит к более быстрому нагреванию жидкости внутри упаковки за счет увеличения скорости. Поскольку температура продукта становится однородной, то гидростатические силы уменьшаются. Это приводит к прекращению циркуляции и снижению скорости потока у стенок упаковки. В результате SHZ смещается в нижнюю часть объема жидкости, а при температурах, которые влияют на термоинактивацию, перемещается ко дну упаковки. Циркуляционных контуров на

графическом отображении результатов моделирования не показано [1, 3–6].

При определении режимов стерилизации одной из основных задач является достижение промышленной стерильности консервов, которое возможно если значение фактической летальности ( $F_{\text{факт}}$ ) будет больше или равно значению требуемой летальности ( $F_{\text{треб}}$ ).  $F_{\text{факт}}$  определяют экспериментально путем измерения температуры продукта в SHZ в процессе термообработки и таких параметров, как  $z$  – температурный параметр термоустойчивости микроорганизмов и  $T_0$  – базисная температура [7–10]. Величина фактического летального эффекта зависит от температурного параметра тест-культуры микроорганизмов, по отношению к которому рассчитывается эффект термической обработки [11–14]. Базовым показателем для создания условий гарантированной термической инактивации целевой микрофлоры является динамика температуры в процессе термической обработки – динамика прогреваемости [15–18].

Режимы термической обработки определяются способом нагрева и физическими свойствами продукта. В консервной промышленности точный анализ механизма теплопередачи поможет улучшить качество продукта и оптимизировать условия процесса. Механизмами теплопередачи упакованного продукта являются проводимость для твердых веществ и жидких продуктов с высокой вязкостью, естественная конвекция для жидких продуктов с низкой вязкостью,

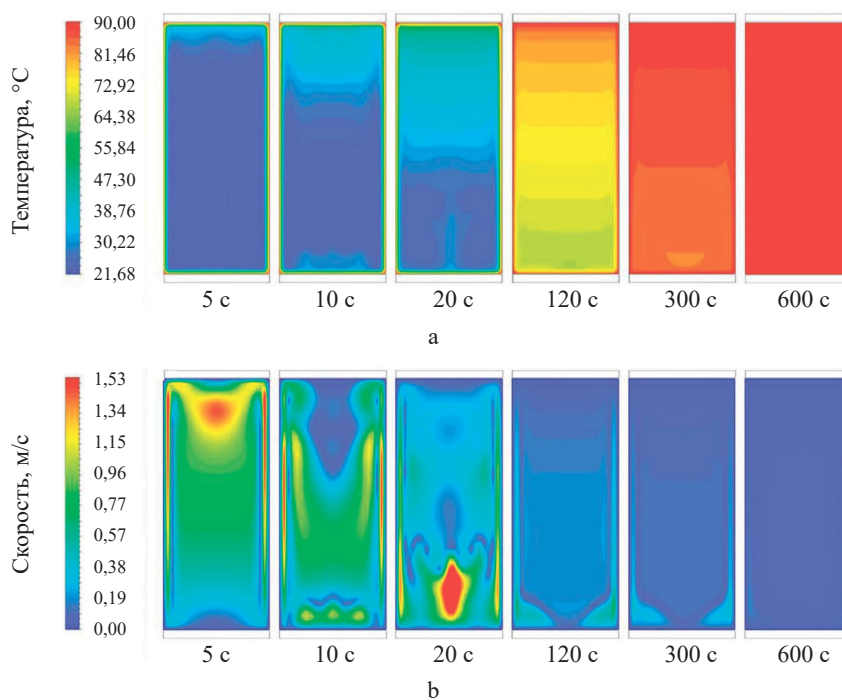


Рисунок 1. Профили изменения температуры (а) и скорости (б) при стерилизации жидких пищевых продуктов через 5, 10, 20, 120, 300 и 600 с [1]

Figure 1. Temperature (a) and speed (b) profiles of liquid food products: 5, 10, 20, 120, 300, and 600 s after the onset of sterilization [1]

конвекция и теплопроводность для жидких продуктов с твердыми частицами и конвекцией. Важным фактором является отношение теплопроводности дисперсной фазы, стенок и дисперсионной среды [19, 20].

На теплообмен влияет геометрия упаковки, особенно в отношении конвективных потоков. Если использовать упаковку с другим соотношением высоты и диаметра, то необходимое время стерилизации будет варьироваться [21]. При условии неизменности локализации SHZ в продуктах с преимущественным теплообменом, осуществляемым теплопроводностью, определение динамики прогреваемости обуславливается геометрией упаковки и техническими характеристиками датчиков температуры. Изменение локализации SHZ в процессе тепловой обработки может вызывать конвективные потоки. В процессе обработки гомофазных продуктов с конвективным теплообменом имеет место нелинейная динамика локализации SHZ. В гетерофазных продуктах имеет место дополнительный фактор: механические частицы дисперсной фазы, представленные твердым агрегатным состоянием, которые нарушают общую динамику тепловых конвекционных потоков. Из-за этого неизбежна динамика локализации SHZ в процессе термической обработки.

Большинство консервированных продуктов относится к гетерофазным системам, в которых при нагревании возникают конвективные потоки Рэлея – Бенара. В плоском горизонтальном слое жидкости возникает естественная конвекция, а нагрев продукта идет снизу [22]. Возможность возникновения и развитие конвективных потоков при тепловой обработке является ключевым фактором теплообмена любой гетерофазной системы с жидкой дисперсионной средой, динамика которой выражается вязкостью, геометрией упаковки, плотностью и др. Например, наличие твердых частиц в упаковке заставляет мигрировать SHZ из-за трудности движения жидкости за счет естественной конвекции [23].

Для пищевых систем с конвективным и преимущественно конвективным теплообменом, в которых происходит миграция SHZ, летальность процесса будет отличаться от значения, рассчитанного исходя из фиксированного местоположения термопары при ее следовании за миграцией этой зоны. Следовательно, при определении режимов тепловой обработки необходимо учитывать миграцию SHZ.

Данная работа посвящена исследованию наличия статистически значимого отличия летальностей для фиксированной и мигрирующей зон.

#### Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали модельные пищевые системы. Данные системы поместили в стеклянные банки с винтовым типом укупорки (венчик горловины типа III) вместимостью нетто 190 мл, диаметр крышки 52 мм. В качестве модельных систем применили следующие:

- FS1 – гетерофазная модельная система, включающая невовлекаемую в конвекцию дисперсную фазу (полиакриловые шары Ø 8мм) и жидкую дисперсионную среду (водный раствор с 1,5 % сахарозы и 1,5 % NaCl);
- FS2 – гетерофазная модельная система, включающая невовлекаемую в конвекцию дисперсную фазу (полиакриловые шары Ø 8мм) и жидкую дисперсионную среду (11 %-ый водный раствор сахарозы);
- FS3 – гомофазная модельная система, представленная восстановленным осветленным яблочным соком для детского питания промышленного производства (11,2 % растворимых сухих веществ);
- FS4 – гетерофазная модельная система, представленная восстановленным яблочным соком с мякотью для детского питания промышленного производства (11,2 % растворимых сухих веществ), включающая вовлекаемую в конвекцию дисперсную фазу.

В гетерофазных модельных системах с невовлекаемой в конвекцию дисперсной фазой ее масса составила 174,4 г.

Объекты исследования помещали в стеклянные банки, в крышке закрепляли штуцер-переходник для герметизированного введения термопары Ø 1,2 мм. Данную термопару устанавливали по центральной оси банки на геометрической высоте от дна. Формирование массива данных для учета миграции SHZ осуществляли для каждой температуры термостатирования при локализации термопары на геометрической высоте, значения которой представлены в таблице 1.

Контроль температуры в процессе тепловой обработки осуществляли с помощью многоканальной системы E-Val Pro (производитель ELLAB A\S, Дания) и датчиков температуры SSA-TS с диапазоном измерений от –20 до +135 °С. Температуры прогрева фиксировали в автоматическом режиме с дискретностью 30 с.

Динамика прогрева включала два этапа: этап собственно нагрева и этап охлаждения. Этап нагрева для модельных систем FS1, FS2 и FS3 составил 30 мин,

Таблица 1. Геометрическая высота локализации термопары для определения динамики прогревания модельных систем с учетом миграции SHZ

Table 1. Geometric height of thermocouple localization: identifying the heating dynamics of model systems based the slowest heating zone movement

Модельная система	Температура термостатирования, °С	Геометрическая высота локализации термопары, мм
FS1	75, 80, 85, 90, 95	3, 6, 9, 12, 15, 18
FS2	75, 80, 85, 90, 95	3, 6, 9, 12, 15, 18
FS3	75, 80, 85, 90, 95	3, 6, 9, 12, 18, 24
FS4	75, 80, 85, 90, 95	12, 18, 24, 30, 36

для модельной системы FS4 – 55 мин. Этап охлаждения для модельных систем FS1, FS2 и FS3 составил 10 мин, для модельной системы FS4 – 15 мин.

Прогревы всех пищевых систем проводили в водяном термостате MLW (Польша) в изотермических условиях при одинаковой начальной температуре содержимого в банке  $30,0 \pm 0,1$  °С. Охлаждение проводили при температуре теплоносителя  $21,0 \pm 0,1$  °С.

Для уменьшения статистической погрешности каждый эксперимент проводили в пятикратной повторности с отсеиванием статистически недостоверных данных.

Математическую обработку проводили с использованием оригинального программного обеспечения, прилагаемого к аналитическому оборудованию, а также специализированного программного обеспечения TableCurve 2D v.5.01 (SYSTAT Software Inc.), Wolfram Mathematica 10.4 и табличного процессора Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation) со встроенным языком программирования VBA.

### Результаты и их обсуждение

Х. Zhu и Q. Zhou выявили наличие миграции SHZ как для гомофазных, так и для гетерофазных пищевых систем [22]. Это позволяет сделать предположение о том, что в случае следования термопары за миграцией и SHZ летальность тепловой обработки будет отличаться от рассчитанной на основе динамики прогревов, определенной при фиксированном местоположении термопары.

На первом этапе для объектов исследования определили значения летальности при каждом значении температуры стерилизации (табл. 1). На основании данных экспериментальных термограмм прогревов FS и формулы (1) рассчитали значения летальностей  $F$  для всех модельных систем при каждой  $t_{st}$  (табл. 2).

$$F = \sum_{i=2}^n (t_i - t_{i-1}) \times 10^{\frac{t_i - t_{ref}}{z}} \quad (1)$$

где  $t$  – температура в SHZ, °С;  $t_{ref}$  – референтная температура, °С;  $z$  – показатель термоустойчивости тест-культуры микроорганизмов, °С;  $n$  – количество точек наблюдения в термограмме. Для расчетов значение  $t_{ref}$  принимали равным 80 °С,  $z$  – 15 °С.

На основании полученных данных для каждой модельной системы определили математические описания зависимости летальности в результате тепловой обработки от температуры стерилизации. Математическое описание, удовлетворяющее статистическим критериям, имеет вид

$$\lg F = a + b \times (t_{st} - t_{ref}) \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты;  $t_{st}$  – температура теплоносителя, °С;  $t_{ref}$  – референтная температура, °С. В качестве референтной температуры принято значение, использованное при расчете летальности, – 80 °С.

Значения коэффициентов и их статистические характеристики, а также статистические характеристики полученных зависимостей представлены в таблице 3.

Таблица 2. Значения летальностей в результате тепловой обработки модельных систем при фиксированной локализации SHZ для заданных температур стерилизации

Table 2. Lethality after heat treatment for given sterilization temperatures: model systems with fixed slowest heating zone

Модельная система	Геометрическая высота фиксированной SHZ, мм от дна	Летальность, усл. мин				
		75 °С	80 °С	85 °С	90 °С	95 °С
FS1	7	5,78	12,21	25,94	54,90	118,62
FS2	7	5,85	11,92	25,39	53,31	117,93
FS3	7	5,13	10,75	22,59	42,28	102,58
FS4	18	10,30	22,19	46,80	103,98	223,72

Таблица 3. Статистические характеристики зависимостей летальностей в результате тепловой обработки модельных систем при фиксированной локализации SHZ от температуры стерилизации

Table 3. Effect of sterilization temperature on lethality after heat treatment: model systems with fixed slowest heating zone

Модельная система		Коэффициенты		Статистика	
		$a$	$b$	$r^2$	$P > F$
FS1	значение	1,082088019	0,066123723	0,9999679629	< 0,00001
	$P >  t $	< 0,00001	< 0,00001		
FS2	значение	1,072428903	0,066603754	0,9997314926	< 0,00001
	$P >  t $	< 0,00001	0,00001		
FS3	значение	1,028718861	0,065488505	0,9999954006	< 0,00001
	$P >  t $	< 0,00001	< 0,00001		
FS4	значение	1,348145259	0,066776881	0,9999432521	< 0,00001
	$P >  t $	< 0,00001	< 0,00001		

Анализ статистических данных показывает, что полученные математические описания адекватны как в части коэффициентов по критерию Стьюдента, так и по критерию Фишера, а также хорошо аппроксимируют исходные данные.

Определение летальностей для модельных систем с учетом миграции SHZ в процессе тепловой обработки затруднено из-за отсутствия как аппаратной, так и программной возможности непосредственного определения. В связи с этим для каждой модельной системы при каждом значении температуры термостатирования (стерилизации) по временным протоколам, идентичным модельным системам с фиксированной SHZ, было получено несколько термограмм. Каждая из них соответствовала своей геометрической высоте локализации термопары по вертикальной оси банки.

Каждая термограмма включала в себя как область нагрева, так и область охлаждения. Совокупность данных каждой термограммы аппроксимировали, следуя общему принципу:

$$t = \begin{cases} t_H, & \tau \leq \tau_{H(\max)} \\ t_C, & \tau > \tau_{H(\max)} \end{cases} \quad (3)$$

где  $t$  – температура модельной системы в зоне локализации термопары, °C;  $t_H$  – температура, соответствующая области нагрева, °C;  $t_C$  – температура,

$$t_H = \begin{cases} t_{h(i)} = f_{h(i)}(\tau) |_{i=1,2,\dots} \\ t_{i,j} = \frac{h_j - h_{i-1}}{h_i - h_{i-1}} \times [f_{h(i)}(\tau) - f_{h(i-1)}(\tau)] + f_{h(i-1)}(\tau), & h_{i-1} < h_j < h_i |_{i=2,3,\dots} \end{cases} \quad (6)$$

$$t_C = \begin{cases} t_{h(i)} = f_{h(i)}(\tau) |_{i=1,2,\dots} \\ t_{i,j} = \frac{h_j - h_{i-1}}{h_i - h_{i-1}} \times [f_{h(i)}(\tau) - f_{h(i-1)}(\tau)] + f_{h(i-1)}(\tau), & h_{i-1} < h_j < h_i |_{i=2,3,\dots} \end{cases} \quad (7)$$

где  $h_i$  и  $h_{i-1}$  – фиксированные (экспериментальные) значения геометрической высоты локализации термопары, мм;  $h_j$  – промежуточное значение геометрической высоты, мм.

Таким образом, были получены массивы данных  $i \times j$  размером  $1800 \times 751$  (для каждого варианта FS1 и  $t_{st} = 75$  °C для FS2),  $1800 \times 801$  (для каждого из остальных вариантов FS2),  $1800 \times 1501$  (для каждого варианта FS3) и  $4200 \times 801$  (для каждого варианта FS4).

Для каждого  $i$ -го момента времени для каждого  $j$ -го дискретного значения геометрической высоты локализации термопары был рассчитан критерий сходимости  $q$ :

$$q_{i,j} = |h_j - f_m(t_{i,j})| \quad (8)$$

где  $h_j$  –  $j$ -е дискретное значение геометрической высоты массива данных, мм;  $f_m(t_i)$  – расчетное зна-

соответствующая области охлаждения, °C;  $\tau_{H(\max)}$  – максимальная продолжительность нагрева, с.

Динамику температуры в зоне локализации термопары для каждой из областей описывали обобщенной функцией вида

$$f(\tau) = (t_{\max} - t_{\min}) \times \exp\{-\exp[-d(\tau)]\} + t_{\min} \quad (4)$$

где  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$  – максимальная и минимальная температуры области термограммы соответственно, °C;  $d(\tau)$  – эмпирическая функция, аппроксимирующая экспериментальные данные, которые предварительно закодировали следующим образом:

$$d_i = -\ln\left[-\ln\left(\frac{t_i - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}\right)\right] \quad (5)$$

Однако каждая полученная обобщенная функция соответствовала своей фиксированной геометрической высоте локализации термопары в модельной системе. Для получения массива данных по промежуточным значениям геометрических высот была выполнена линейно-кусочная аппроксимация в среде Microsoft Excel с дискретизацией продолжительности тепловой обработки с шагом 1 с и промежуточных значений геометрической высоты с шагом 0,02 мм для FS1, FS2 и FS3 и 0,03 мм для FS4 для областей нагрева (уравнение 6) и охлаждения (уравнение 7):

чение геометрической высоты локализации мигрирующей SHZ, соответствующее значению массива температур с координатами  $i$  и  $j$ , °C.

Для каждой модельной системы использовали соответствующую ему функциональную зависимость геометрической высоты локализации мигрирующей SHZ от температуры, которую определили ранее.

Таким образом, каждому массиву температур соответствовал равнозначный по размеру массив значений критерия сходимости. На основании данных пар массивов получили возможность для каждого  $i$ -го момента времени определить значение температуры в зоне с геометрической высотой:

$$t_i = t_{i,j} |_{j: \min(q_{i,j})} \quad (9)$$

В соответствии с логикой использованного подхода полученные массивы значений температуры

в совокупности формировали термограммы мигрирующих SHZ, на основании которых выполняли последующие расчеты.

На основании полученных термограмм по формуле (1) определили значения летальностей с учетом миграции SHZ для каждой температуры стерилизации. Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Анализ материалов таблицы позволяет сделать вывод о том, что зависимость летальности от температуры стерилизации для всех исследованных модельных систем по своему виду эквивалентна таковой для вариантов с фиксированной локализацией SHZ. Для подтверждения этого полученные данные были аппроксимированы функцией (1). Результаты аппроксимаций и их статистические характеристики представлены в таблице 5.

Анализ статистических данных показывает, что полученные математические описания адекватны как в части коэффициентов по критерию Стьюдента, так и по критерию Фишера, а также аппроксимируют исходные данные.

При аппроксимации значений летальности от температуры стерилизации в вариантах как с фиксированной, так и с мигрирующей SHZ средствами пакета Table Curve 2D в каждой дискретной точке в расчетном интервале температур стерилизации от 70 до 100 °С с интервалом 0,01 °С определили значения доверительных интервалов при  $\alpha \leq 0,05$  и их

верхние и нижние границы. В силу того, что функция зависимости летальности от температуры для мигрирующей SHZ в сходственных точках имеет априори меньшие значения, чем для фиксированной SHZ, то основным условием статистической значимости разницы летальностей между двумя полученными зависимостями является следующее:

$$F_m(t) + CI_m(t) < F_f(t) - CI_f(t) \quad (10)$$

где  $F_m(t)$  и  $F_f(t)$  – значения летальностей в модельных системах с мигрирующей и фиксированной SHZ соответственно при температуре стерилизации  $t$ , усл. мин;  $CI_m(t)$  и  $CI_f(t)$  – значения доверительного интервала для модельных систем с мигрирующей и фиксированной SHZ соответственно при температуре стерилизации  $t$ , усл. мин.

Данные по интервалам температур стерилизации для каждой из модельных сред, соответствующих статистически значимой разности летальностей, представлены в таблице 6.

Анализ полученных данных показывает отсутствие значимой разницы летальностей на всей исследованной области определения значений температур стерилизации для модельной системы FS1, т. е. для данной модельной системы практически отсутствует целесообразность учета миграции SHZ в процессе тепловой обработки для установления режимов стерилизации. Графические данные по взаимному расположению кривых, соответствующих зависимостям летальности от температуры стерилизации с учетом и без учета миграции SHZ для модельной системы FS1, представлены на рисунке 2.

В отношении остальных модельных систем можно говорить о наличии интервалов температур стерилизации, на которых разница летальностей статистически существенна. Графические данные по взаимному расположению кривых, соответствующих зависимостям летальности от температуры стерилизации с учетом и без учета миграции SHZ для модельных систем FS2, FS3 и FS4, представлены на рисунках 3–5.

Таблица 4. Значения летальностей в результате тепловой обработки модельных систем с учетом миграции SHZ для заданных температур стерилизации

Table 4. Lethality after heat treatment for given sterilization temperatures: model systems with moving slowest heating zone

Модельная система	Летальность, усл. мин				
	75 °С	80 °С	85 °С	90 °С	95 °С
FS1	5,58	12,07	25,79	54,71	114,09
FS2	5,44	11,74	24,40	51,79	110,25
FS3	4,84	9,96	21,51	46,31	100,71
FS4	8,44	16,03	36,43	84,87	125,35

Таблица 5. Статистические характеристики зависимостей летальностей в результате тепловой обработки модельных систем с учетом миграции SHZ от температуры стерилизации

Table 5. Effect of sterilization temperature on lethality after heat treatment: model systems with moving slowest heating zone

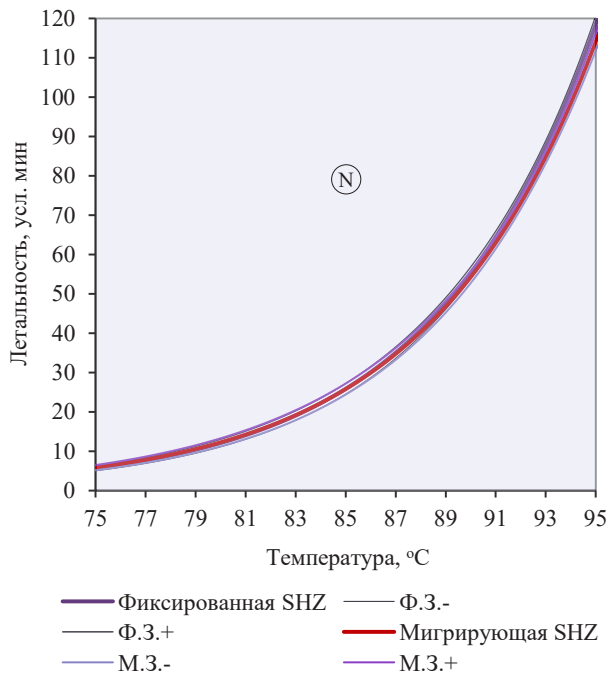
Модельная система	Коэффициенты		Статистика		
		$a$	$b$	$r^2$	$P > F$
FS1	значение	1,088844058	0,064576240	0,9999618494	< 0,00001
	$P >  t $	< 0,00001	< 0,00001		
FS2	значение	1,060848451	0,065425607	0,9999909250	< 0,00001
	$P >  t $	< 0,00001	< 0,00001		
FS3	значение	0,995993634	0,067125749	0,9999825775	< 0,00001
	$P >  t $	< 0,00001	< 0,00001		
FS4	значение	1,200220697	0,072830723	0,9992640617	0,00037
	$P >  t $	0,00025	0,00080		

Несмотря на наличие интервалов температур, которым соответствуют статистически значимые разности летальностей для модельных систем FS2, FS3 и FS4, для первых двух систем величина данной разницы крайне мала.

Таблица 6. Интервалы температуры стерилизации, на которых разница летальностей при тепловой обработке модельных систем с учетом фиксированной и мигрирующей SHZ статистически существенна

Table 6. Sterilization temperature intervals with statistically significant lethality difference during heat treatment: model systems with fixed vs. moving slowest heating zones

Модельная система	Интервал температуры стерилизации, °C	
	Начало	Окончание
FS1	–	–
FS2	91,41	97,26
FS3	87,38	94,44
FS4	75,40	94,36



Примечание. Ф.З.- и Ф.З.+ – нижняя и верхняя границы доверительного интервала для фиксированной SHZ соответственно; М.З.- и М.З.+ – нижняя и верхняя границы доверительного интервала для мигрирующей SHZ соответственно; S и N – диапазоны температур стерилизации, в которых разница летальностей между вариантами с фиксированной и мигрирующей SHZ статистически существенна и несущественна соответственно

Рисунок 2. Влияние температуры стерилизации на величину летальности при тепловой обработке FS1, определенной в фиксированной SHZ и с учетом ее миграции

Figure 2. Effect of sterilization temperature on lethality value for Food System 1: fixed vs. moving slowest heating zones

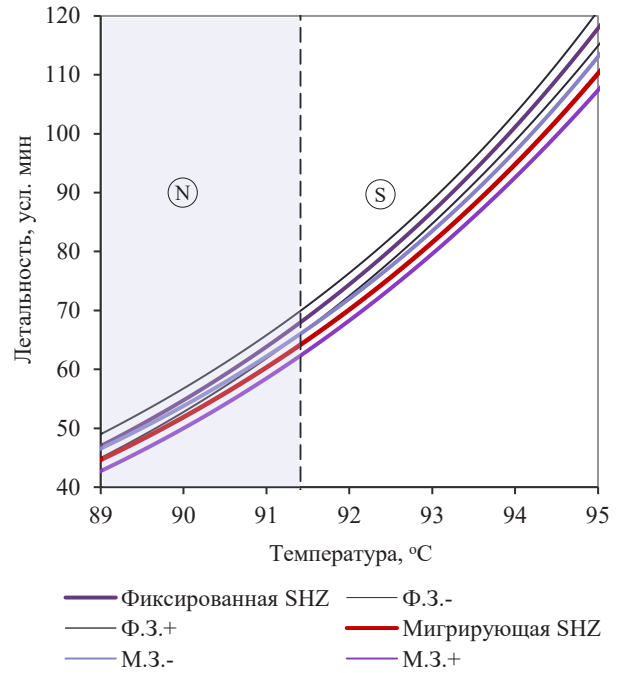


Рисунок 3. Влияние температуры стерилизации на величину летальности при тепловой обработке FS2, определенной в фиксированной SHZ и с учетом ее миграции

Figure 3. Effect of sterilization temperature on lethality value for Food System 2: fixed vs. moving slowest heating zones

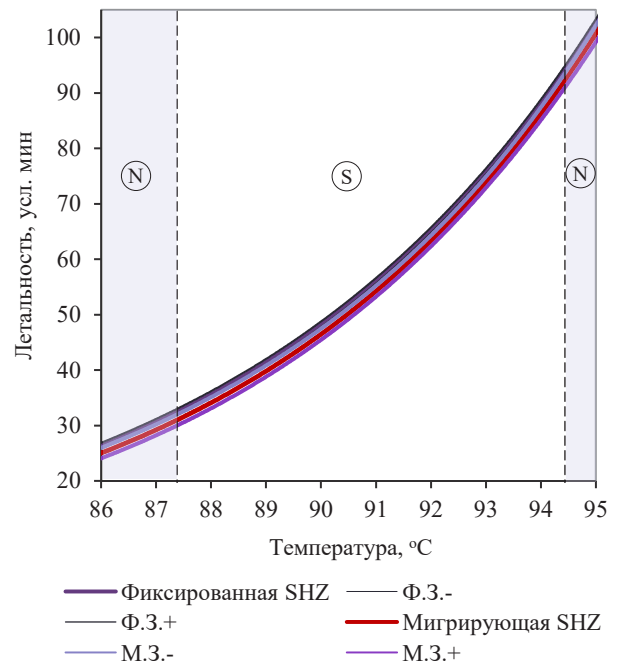


Рисунок 4. Влияние температуры стерилизации на величину летальности при тепловой обработке FS3, определенной в фиксированной SHZ и с учетом ее миграции

Figure 4. Effect of sterilization temperature on lethality value for Food System 3: fixed vs. moving slowest heating zones



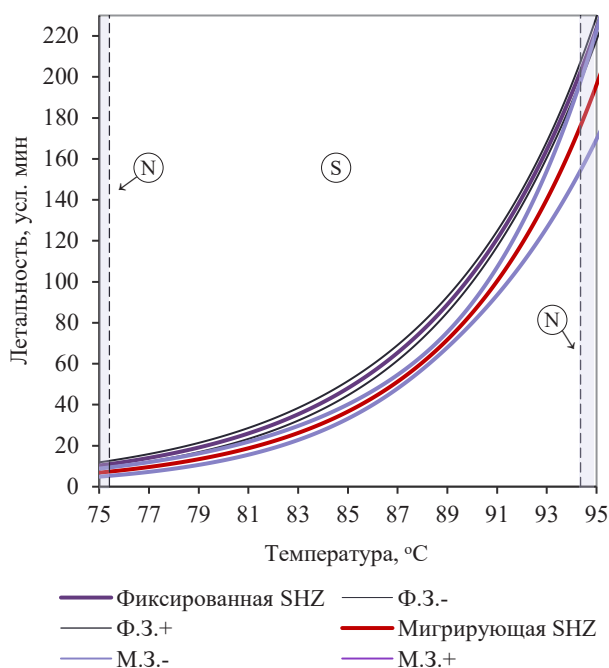


Рисунок 5. Влияние температуры стерилизации на величину летальности при тепловой обработке FS4, определенной в фиксированной SHZ и с учетом ее миграции

Figure 5. Effect of sterilization temperature on lethality value for Food System 4: fixed vs. moving slowest heating zones

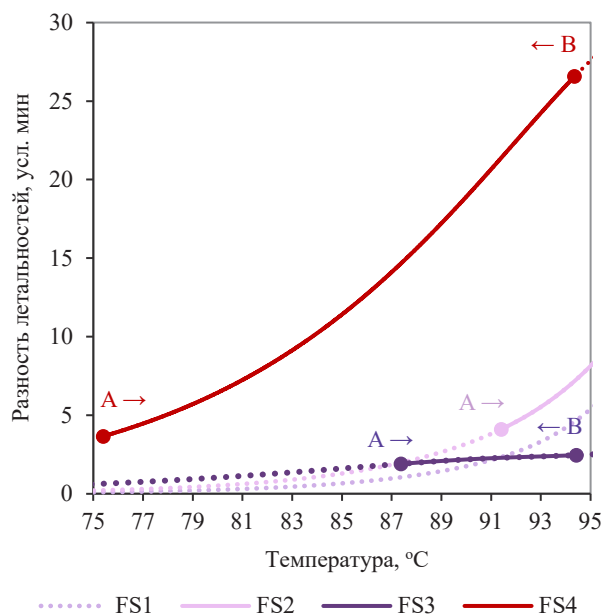
Таблица 7. Интервалы температуры стерилизации, на которых разница летальностей при тепловой обработке модельных сред с учетом фиксированной и мигрирующей SHZ статистически существенна

Table 7. Sterilization temperature intervals with statistically significant lethality difference during heat treatment: fixed vs. moving slowest heating zones

Модельная система	Интервал температур, °C	Максимальная разница летальностей, усл. мин
FS1	–	–
FS2	5,85	8,14
FS3	7,06	2,50
FS4	18,96	26,55

На рисунке 6 представлены данные по влиянию температуры стерилизации на разность летальностей.

Анализ представленных данных показывает, что наибольшая разность на всем диапазоне варьирования соответствует модельной системе FS4, что связано с влиянием вовлекаемой в конвективный поток дисперсной фазой. Присутствие сложной взаимосвязи между возмущением конвекционного потока мелкодисперсной мякотью выражено нелинейной суперпозицией конвективного теплообмена в объеме дисперсионной среды и теплообмена, а также тепло-



Примечание. Пунктирные линии – влияние температуры на разность летальностей на всей области определения; сплошные линии – статистически значимые значения разности летальностей при  $\alpha \leq 0,05$ ; A и B – начало и окончание интервала температур стерилизации соответственно, на котором разности летальностей статистически значимы при  $\alpha \leq 0,05$

Рисунок 6. Влияние температуры стерилизации на разность летальностей между вариантами с фиксированной и мигрирующей SHZ

Figure 6. Effect of sterilization temperature on lethality difference: fixed vs. moving slowest heating zones

проводностью в объеме каждой частицы дисперсной фазы в процессе тепловой обработки.

Совокупное представление об интегральной значимости учета миграции SHZ для разработки режимов тепловой стерилизации можно получить из анализа эффективного интервала температур и максимальной разности летальностей (табл. 7)

Для модельных систем характерен минимум максимальной разности летальностей на уровне, не превышающем 8,14 усл. мин, при одновременном минимуме эффективного интервала температур, на котором эта разность статистически значима.

Таким образом, при разработке режимов стерилизации из всех исследованных вариантов целесообразно учитывать миграцию SHZ только для одной группы пищевых систем – гетерофазных с конвективным и преимущественно конвективным теплообменом и с вовлекаемой в конвекционный поток дисперсной фазой.

### Выводы

Миграция SHZ для пищевых систем с невовлекаемой в конвекцию дисперсной фазой (FS1, FS2, FS3) выявляется в периоды начала нагрева и охлаждения

при температурах, не влияющих на термоинактивацию микроорганизмов. При разработке режимов стерилизации из всех исследованных вариантов целесообразно учитывать миграцию зоны наименьшего прогревания только для одной группы пищевых систем – гетерофазных с конвективным и преимущественно конвективным теплообменом и с вовлекаемой в конвекционный поток дисперсной фазой (FS4), таких как плодово-ягодные и овощные соки с мякотью. Расчет режимов стерилизации без учета конвекции может привести к длительной температурной обработке и получению продукта с измененными качественными характеристиками. Для этой группы пищевых систем необходимо определение локализации SHZ для каждого вида продукта, объема и типа упаковки.

#### Критерии авторства

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за достоверность информации и уникальность разработок.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Contribution

All the authors equally participated in the research and are equally responsible for the accuracy of the information and any potential cases of plagiarism.

#### Conflict of interest

The authors declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

#### References/Список литературы

1. Park HW, Yoon WB. Computational Fluid Dynamics (CFD) modelling and application for sterilization of foods: A review. *Processes*. 2018;6(6). <https://doi.org/10.3390/pr6060062>
2. Borah R, Gupta S, Mishra L, Chhabra RP. Heating of liquid foods in cans: Effects of can geometry, orientation, and food rheology. *Journal of Food Process Engineering*. 2020;7(43). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13420>
3. Jahanbakhshian N, Hamdami N. Numerical simulation of heat and mass transfer during heating and cooling parts of canned-green-olive pasteurization. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(12). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13909>
4. 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):113–125. <https://doi.org/10.22067/iftstrj.v0i0.71219>
5. Mohamed IO. Modeling and simulation of thermal sterilization of conduction heat canned foods using heat transfer coefficients boundary conditions. *International Journal of Food Processing and Technology*. 2016;3(2):48–53. <https://doi.org/10.15379/2408-9826.2016.03.02.03>
6. Lee MG, Yoon WB. Developing an effective method to determine the deviation of  $F$  value upon the location of a still can during convection heating using CFD and subzones. *Journal of Food Process Engineering*. 2014;37(5):493–505. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12107>
7. Stolyanov A, Zhuk A, Kaychenov A, Kuranova L. Comparative analysis of temperature loggers used in the development of regimes for heat treatment of food production in autoclaves. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;302. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/302/1/012031>
8. Montanari A, Barone C, Barone M, Santangelo A. Thermal treatments of canned foods. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2018;410:5099–5100. <https://doi.org/10.1007/s00216-018-1158-8>
9. Montanari A, Barone C, Barone M, Santangelo A. Canned foods: Principles of thermal processing. In: Montanari A, Barone C, Barone M, Santangelo A, editors. *Thermal treatments of canned foods*. Cham: Springer; 2018. pp. 1–15. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74132-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74132-1_1)
10. Ziogou C, Kostoglou M, Georgiadis MC. Nonlinear model predictive control of food sterilization processes. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2021;50:1155–1160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88506-5.50178-9>
11. Zhuk A, Stolyanov A, Kaychenov A, Kuranova A, Grokhovsky V. Software for calculating the actual lethality of canned food heat treatment processes: Development and application. *E3S Web of Conferences*. 2021;273. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127313002>
12. Krylova VB, Gustova TV, Bataeva DS, Gorbunov VN. On the question of using melting indicators for controlling sterilization temperature parameters. *Vsyo o Myase*. 2021;(2):52–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2021-2-52-54>
13. Tucker G, Featherstone S. *Essentials of thermal processing*. Ames: Wiley-Blackwell; 2011. 264 p.
14. Skoglund T. On the common misuse of a constant  $z$ -value for calculations of thermal inactivation of microorganisms. *Journal of Food Engineering*. 2022;314. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110766>
15. Jafarpour D, Hashemi SMB. Ohmic heating application in food processing: Recent achievements and perspectives. *Foods and Raw Materials*. 2022;10(2):216–226. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-531>

16. Riazantseva KA, Sherstneva NE. Traditional and innovative uses of ultraviolet treatment in the dairy industry. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(2):390–406. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372>
17. Stier R. Swainson's handbook of technical and quality management for the food manufacturing sector. Woodhead Publishing; 2019. 606 p.
18. Friso D. A new mathematical model for food thermal process prediction. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2013;2013. <https://doi.org/10.1155/2013/569473>
19. Serami MS, Ramezan Y, Khashehchi M. CFD simulation and experimental validation of in-container thermal processing in Fesenjan stew. *Food Science and Nutrition*. 2020;9(2):1079–1087. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2083>
20. Erdoğan F, Uyar R, Palazoğlu TK. Experimental comparison of natural convection and conduction heat transfer. *Journal of Food Process Engineering*. 2010;33(1):85–100. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00309.x>
21. Rinaldi M, Malavasi M, Cordioli M, Barbanti D. Investigation of influence of container geometry and starch concentration on thermal treated in-package food models by means of Computational Fluid Dynamics (CFD). *Food and Bioproducts Processing*. 2018;108:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.12.003>
22. Zhu X, Zhou Q. Flow structures of turbulent Rayleigh–Bénard convection in annular cells with aspect ratio one and larger. *Acta Mechanica Sinica*. 2021;37(8):1291–1298. <https://doi.org/10.1007/s10409-021-01104-z>
23. Kondratenko VV, Kanevsky BL, Pokudina GP, Senkevich VI, Borchenkova LA. Slowest heating zone migration for heterophase model food system when sterilized. *Bulletin of KSAU*. 2021;176(11):188–197. (In Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-11-188-197>