

## Исследование миграции зоны наименьшего прогревания сока яблочного осветлённого в процессе тепловой обработки






Владимир В. Кондратенко	<sup>1</sup>	<a href="mailto:nauka@vniitek.ru">nauka@vniitek.ru</a>	 0000-0002-0913-5644
Борис Л. Каневский	<sup>1</sup>	<a href="mailto:borka5@yandex.ru">borka5@yandex.ru</a>	 0000-0001-9432-4257
Галина П. Покудина	<sup>1</sup>	<a href="mailto:konservtech@rambler.ru">konservtech@rambler.ru</a>	 0000-0002-5692-7839
Лидия А. Борченкова	<sup>1</sup>	<a href="mailto:borchenkova@rambler.ru">borchenkova@rambler.ru</a>	 0000-0002-1230-5990
Вячеслав И. Сенкевич	<sup>1</sup>	<a href="mailto:vnikop@gmail.com">vnikop@gmail.com</a>	 0000-0001-5684-7006

<sup>1</sup> ВНИИТсК – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр им. В.М. Горбатова» РАН, ул. Школьная, 78, г. Видное, М.О., 142703, Россия

**Аннотация.** При разработке режимов термической стерилизации пищевых продуктов необходимо определить условия гарантированной гибели тест-культур микроорганизмов и их спор в зоне наименьшего прогревания. Местоположение этой зоны является критическим параметром в тепловых процессах. В настоящее время существуют противоречивые представления о локализации и возможной миграции зоны наименьшего прогревания в процессе термической стерилизации продуктов с конвективным теплообменом. Изучена кинетика локализации зоны наименьшего прогревания в объёме среды с конвективным теплообменом в процессе термической обработки в связке с реологическими свойствами. В качестве объектов использовали сок яблочный осветлённый для детского питания отечественного производства. Шуп размещали таким образом, чтобы термопара располагалась по вертикальной оси банки на геометрической высоте 3, 6, 9, 12, 18 и 24 мм. При каждом значении высоты расположения термопары банку с образцом термостатировали в течение 20 мин, после чего быстро охлаждали в течение 10 мин. Прогревы осуществляли при температуре термостатирования 75, 80, 85, 90 и 95 °С. В образцах также исследовали динамику реологических свойств в изотермических условиях при температурах 30, 35, 40, 45, 50, 55 и 60 °С и интервале значений скорости сдвига от 0 до 700 с<sup>-1</sup>. В результате проведённых исследований экспериментально установлено наличие миграции зоны наименьшего прогревания в процессе термической обработки однофазных сред с конвективным теплообменом, исследована её кинетика, установлен нелинейный и обратимый характер миграции зоны наименьшего прогревания. Предложен механизм протекания процесса миграции зоны наименьшего прогревания с учётом динамики реологии нагреваемой среды и взаимодействия конвективных потоков.

**Ключевые слова:** зона прогревания, миграция, тепловая обработка, консервирование, яблочный сок

## Investigation of the migration of the least heating zone of clarified apple juice during heat treatment

Vladimir V. Kondratenko	<sup>1</sup>	<a href="mailto:nauka@vniitek.ru">nauka@vniitek.ru</a>	 0000-0002-0913-5644
Boris L. Kanevskiy	<sup>1</sup>	<a href="mailto:borka5@yandex.ru">borka5@yandex.ru</a>	 0000-0001-9432-4257
Galina P. Pokudina	<sup>1</sup>	<a href="mailto:konservtech@rambler.ru">konservtech@rambler.ru</a>	 0000-0002-5692-7839
Lidiya A. Borchenkova	<sup>1</sup>	<a href="mailto:borchenkova@rambler.ru">borchenkova@rambler.ru</a>	 0000-0002-1230-5990
Vyacheslav I. Senkevich	<sup>1</sup>	<a href="mailto:vnikop@gmail.com">vnikop@gmail.com</a>	 0000-0001-5684-7006

<sup>1</sup> Russian Research Institute of Canning Technology – branch of the Gorbatov Federal Research Center for Food Systems at Russian Academy of Sciences, Scholnaya Str., 78, Vidnoe, M.R., 142703, Russia

**Abstract.** When developing modes of food products thermal sterilization, it is necessary to determine the conditions for microorganisms test cultures and their spores guaranteed death in the least heating zone. The location of this zone is a critical parameter in thermal processes. At present, there are conflicting ideas about the localization and possible migration of the zone of least heating in the process of thermal sterilization of products with convective heat transfer. The kinetics of localization of the zone of least heating in the medium volume with convective heat transfer during heat treatment in conjunction with rheological properties was studied in the work. The clarified apple juice for baby food of domestic production was used as the object of study. The probe was placed so that the thermocouple was located on the vertical axis of the can at a geometric height of 3, 6, 9, 12, 18 and 24 mm. At each height value of the thermocouple, the jar with the sample was thermostated for 20 minutes, and then quickly cooled for 10 minutes. Heating was carried out at a thermostat temperature of 75, 80, 85, 90, and 95 °C. The dynamics of rheological properties under isothermal conditions at temperatures of 30, 35, 40, 45, 50, 55, and 60 °C and a range of shear rates from 0 to 700 s<sup>-1</sup> were also studied in the samples. As a result of the studies carried out, the presence of the migration of the zone of least heating during the heat treatment of single-phase media with convective heat transfer was determined experimentally, its kinetics was studied, the non-linear and reversible nature of the migration of the zone of least heating was established. The mechanism of the process of migration of the zone of least heating was proposed taking into account the dynamics of the rheology of the heated medium and the convective flows interaction.

**Keywords:** heating zone, migration, heat processing, canning, apple juice

Для цитирования

Кондратенко В.В., Каневский Б.Л., Покудина Г.П., Борченкова Л.А., Сенкевич В.И. Исследование миграции зоны наименьшего прогревания сока яблочного осветлённого в процессе тепловой обработки // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 1. С. 88–95. doi:10.20914/2310-1202-2020-1-88-95

For citation

Kondratenko V.V., Kanevskiy B.L., Pokudina G.P., Borchenkova L.A., Senkevich V.I. Investigation of the migration of the least heating zone of clarified apple juice during heat treatment. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 1. pp. 88–95. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-1-88-95

## Введение

Одной из основных задач, решаемых посредством консервирования пищевых систем, является обеспечение соответствия конечного продукта промышленной стерильности посредством создания условий, при которых остаточная концентрация тест-культур микроорганизмов не превышает значений, регламентируемых Техническим регламентом Таможенного союза. В настоящее время в России методика установления режимов термической стерилизации консервной продукции основана на априорном положении о линейном виде кинетики устойчивости микроорганизмов в зоне наименьшего прогревания в полулогарифмической системе координат «продолжительность обработки – десятичный логарифм концентрации живых спор микроорганизмов», на основании чего для каждого вида тест-микроорганизмов экспериментально определены значения эмпирических показателей –  $D$  (при референтных значениях температуры) и  $z$ , которые, в свою очередь, являются исходными данными для расчёта требуемой летальности (принцип главного метода). При этом для каждого анализируемого продукта эмпирически подбираются такие режимы термической обработки, при которых достигаемое значение фактической летальности в наименее прогреваемой зоне продукта гарантированно превышает значение требуемой. Однако опыт практического использования подобного подхода во многих случаях приводит к избыточной тепловой нагрузке на продукт, что подтверждается успешно используемыми за рубежом значительно более мягкими режимами, которые не вписываются в существующую отечественную парадигму тепловой обработки, но при этом остаются эффективными, то есть обеспечивают достижение промышленной стерильности.

В мировой практике исследования тепловых физических процессов все гомогенные продукты условно делят на три группы по характеру теплообмена в процессе тепловой обработки [1]: продукты с теплообменом преимущественно конвекцией, с теплообменом теплопроводностью и промежуточным типом теплообмена. Для второй группы определение местоположения наименее прогреваемой зоны, как правило, не вызывает затруднений – оно соответствует геометрическому центру упаковки. Для первой и третьей – ситуация не столь однозначная [2, 3]. Конвективный теплообмен – процесс переноса теплоты при макродвижении жидкости относительно поверхности теплопередачи. Естественная конвекция возникает в поле

внешних массовых сил – в частности, в неподвижной упаковке с продуктом, находящимся в стерилизаторе, – под действием гравитации и вязкого трения. При естественной конвекции поля скоростей и температур частиц процесса теплообмена уравнения энергии и движения рассматриваются совместно. В работе [4] представлены температурные диаграммы, полученные численным моделированием естественного конвективного теплообмена в однородном продукте при подогреве цилиндрической банки паром. В работе показано присутствие «рециркуляционного потока» в нижней части продукта. Было обнаружено, что жидкость внутри сосуда расслаивалась при повышении температуры. Самым медленным местом нагрева в потоке была область в форме тороида рядом с дном банки на высоте примерно одной десятой высоты банки. В то же время в [5] показано, что естественная конвекция вязкого продукта способствует миграции наименее прогреваемой зоны в процессе тепловой обработки вдоль оси упаковки в сторону дна. Данное явление отмечено и в [6–13]. Причём авторы [13] связывают направленность и выраженность миграции наименее прогреваемой зоны с вязкостью и температурой продукта, при этом указывают, что модельные пищевые материалы, как правило, неньютоновские, и, следовательно, вязкость является функцией скорости сдвига и температуры с индексом степени, как правило, меньше единицы.

Основной проблемой является существенное различие в представлениях как о направленности миграции наименее прогреваемой зоны в процессе тепловой обработки, так и о её выраженности. Так, [5] указывает на миграцию в сторону дна упаковки, тогда как [14] утверждает обратное. В то же время [15] постулирует константность данного показателя.

Учитывая противоречивость существующих данных, а также исключительную важность самого явления миграции области наименьшего прогревания для определения фундаментального минимума возможной тепловой нагрузки на продукт, достаточного для достижения промышленной стерильности, был инициирован комплекс исследований в данном направлении.

**Цель работы** – изучить кинетику локализации зоны наименьшего прогревания в объёме среды в процессе термической обработки в связке с реологическими свойствами.

## Материалы и методы

Объектом исследования был сок яблочный осветлённый для детского питания отечественного производства («ФрутоНяня», АО «Прогресс», Россия).

Сок помещали в стеклянную банку III-52–190 с крышкой твист-офф слоем 74 мм (геометрическая высота свободного пространства 20 мм) с расположением геометрического центра продукта по центральной оси на высоте 37 мм. В крышке закрепляли штуцер-переходник для герметизированного введения щупа с термопарой ( $d = 1,2$  мм). Щуп размещали таким образом, чтобы термопара располагалась по центральной оси банки на геометрической высоте 3, 6, 9, 12, 18 и 24 мм. При каждом значении геометрической высоты расположения термопары банку с образцом термостатировали в течение 20 мин, после чего быстро помещали в холодную ( $t = 15$  °C) воду для охлаждения в течение 10 мин. Прогревы осуществляли при температуре термостатирования 75, 80, 85, 90 и 95 °C. Для контроля температуры в процессе тепловой обработки использовали автоматический многоканальный термометр CTF9008 (Ellab), подключённый к термопарам. Дискретность контроля – 30 с.

В образцах также исследовали динамику реологических свойств в изотермических условиях при температурах 30, 35, 40, 45, 50, 55 и 60 °C и интервале значений скорости сдвига от 0 до 700  $\text{с}^{-1}$ .

Для уменьшения статистической погрешности каждый эксперимент проводили в трёхкратной повторности с отсеиванием статистически недостоверных данных [16, 17].

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 (Wolfram Research Inc.) и табличного процессора Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation) со встроенным языком программирования VBA.

### Результаты и обсуждение

Анализ существующего состояния дел в области исследования влияния теплофизических свойств среды на термоустойчивость спор микроорганизмов показал, что вне зависимости от исходной чувствительности к термическому воздействию наибольшая термоустойчивость характерна для спор, находящихся в области наименьшего прогревания. Однако в процессе нагревания среды с конвективным теплообменом вследствие уменьшения плотности среды формируется циркулирующий ток, направленный вверх у стенок сосуда и вниз – в его центре. Результатом такого движения является смещение локализации зоны наименьшего прогревания в сторону дна сосуда. В то же время с увеличением температуры изменяется реология среды, вследствие чего зона наименьшего прогревания должна непрерывно мигрировать, изменяя координату геометрической высоты, с точкой отсчёта от дна сосуда.

С целью проверки данной гипотезы исследовали динамику максимального значения

фактической летальности от времени и локализации термопары при заданных значениях температуры термостатирования в условиях идентичности последовательностей продолжительности нагревания и последующего охлаждения.

Результаты исследований показали, что вне зависимости от температуры термостатирования, общий вид динамики фактической летальности характеризовался первоначальным нелинейным снижением целевого показателя и при достижении некоторого минимума демонстрировал дальнейшее нелинейное увеличение (рисунок 1). Для каждой температуры термостатирования были определены эмпирические функции, адекватно аппроксимирующие экспериментальные данные:

– для температуры стерилизации 75 °C

$$f = \frac{a + c \cdot h + e \cdot h^2}{1 + b \cdot h + d \cdot h^2},$$

где  $a$  – константа;  $b$ ,  $c$ ,  $d$  и  $e$  – коэффициенты;  $h$  – геометрическая высота локализации зоны наименьшего прогревания, мм;

– для температур стерилизации 80, 85, 90 и 95 °C

$$f = \frac{a + c \cdot h + e \cdot h^2}{1 + b \cdot h + d \cdot h^2 + g \cdot h^3},$$

где  $g$  – коэффициент.

Минимальные значения целевого показателя для каждой из температур термостатирования в соответствии с логикой самого показателя были интерпретированы как значения, соответствующие локализации зоны наименьшего прогревания в данных условиях.

Анализ взаимного расположения аналитически определённых экстремумов динамик фактической летальности в исследованном диапазоне варьирования температур термостатирования показал наличие факта девиации – миграции – местоположения зоны наименьшего прогревания в процессе увеличения температуры.

Общий вид динамики миграции зоны наименьшего прогревания демонстрировал выраженный нелинейный геометрически обратимый характер процесса (рисунок 2). Была определена эмпирическая функция (модель), адекватно аппроксимирующая аналитические данные:

$$h = \frac{a + c \cdot t + e \cdot t^2}{1 + b \cdot t + d \cdot t^2},$$

где  $a$  – константа;  $b$ ,  $c$ ,  $d$  и  $e$  – коэффициенты;  $t$  – температура среды, °C.

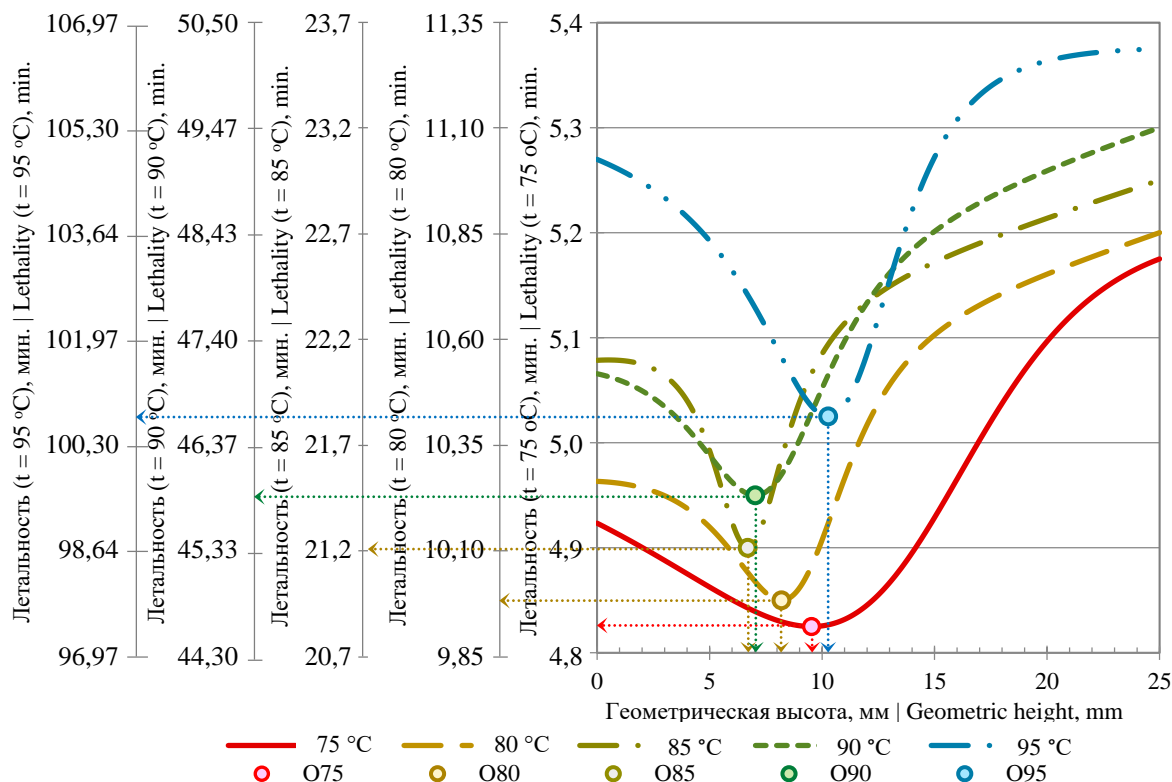


Рисунок 1. Зависимости фактической летальности при заданных значениях температуры термостатирования от геометрической высоты расположения термодпары от дна сосуда

Figure 1. Dependence of actual lethality at specified values of thermostating temperature on geometric height of thermocouple location from vessel bottom

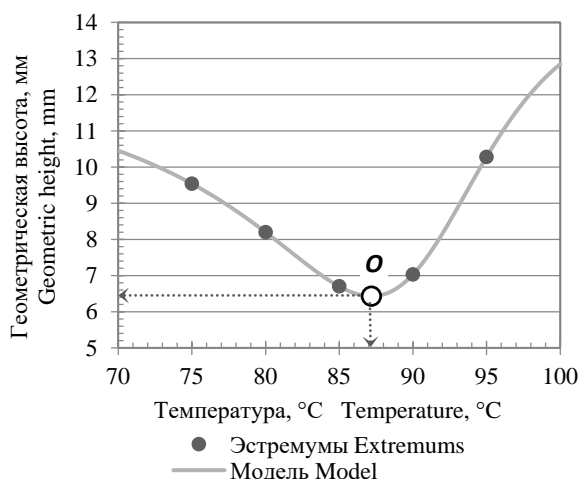


Рисунок 2. Зависимость геометрической высоты расположения зоны наименьшего прогревания от температуры среды

Figure 2. Dependence of geometric height for the cold spot location from the medium temperature

Эмпирическая модель динамики миграции зоны наименьшего прогревания при увеличении температуры в интервале варьирования экспериментальных значений и в областях ближайшей экстраполяции демонстрировала наличие экстремума в точке O [87,18 °C; 6,43 мм], существование которого возможно только из предположения справедливости допущений

исходной гипотезы. Для проверки этого была исследована динамика реологических показателей среды в зависимости от температуры и выраженности механического деформационного воздействия.

Анализ экспериментальных данных показал, что зависимость динамической вязкости от напряжения сдвига и температуры может быть адекватно аппроксимирована обобщающей функцией вида:

$$\eta = \frac{\tau \cdot a_1 \cdot \exp\left(\frac{E_1}{k \cdot (T + \Delta_1)}\right)}{\beta + \tau} + \tau \cdot a_2 \cdot \exp\left(\frac{E_2}{k \cdot (T + \Delta_2)}\right),$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость, Па·с;  $a_1$ ,  $a_2$  и  $\beta$  – константы;  $E_1$  и  $E_2$  – энергии активации течения, Дж/моль;  $k$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль · К;  $T$  – абсолютная температура среды, К;  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – поправки к температуре, К.

На рисунке 3, а показана зависимость применительно к результатам аппроксимации экспериментальных данных.

Отклик динамической вязкости (Dynamic viscosity) на изменение температуры (Temperature) и напряжения сдвига (Share stress) представлен суперпозицией нелинейной и линейной составляющих, отражающих превалирующее влияние факторов сопротивления среды при различном сочетании термического и механического воздействия. При этом увеличение напряжения сдвига провоцирует увеличение динамической вязкости. В то же время увеличение температуры оказывает обратное действие. Следствием этого в динамической системе с конвективным теплообменом, провоцируемым изменением плотности при нагревании, в силу разности температур потоков среды должна возникать относительно сложная картина взаимодействия этих потоков, формируемая нелинейностью динамической вязкости.

В свою очередь, напряжение сдвига находится в зависимости от скорости сдвига (Share rate) и температуры среды. Анализ экспериментальных данных позволил получить эмпирическую модель искомой зависимости (рисунок 3, *b*).

Она адекватно отражается обобщающей функцией, представляющей модифицированную модель Оствальда-де Вале (Ostwald-de Waele):

$$\tau = \left[ a \cdot \exp\left(\frac{E}{k \cdot (T + \Delta)}\right) \cdot \dot{\gamma} \right]^n,$$

где  $a$  – коэффициент;  $E$  – энергия активации течения, Дж/моль;  $\Delta$  – поправка к температуре, К;  $n$  – показатель течения среды.

Зависимость показателя течения от температуры имеет вид

$$n = a + 4 \cdot b \cdot \exp\left(\frac{c-t}{d}\right) \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{c-t}{d}\right) \right],$$

где  $a$  – константа;  $b$ ,  $c$  и  $d$  – коэффициенты;  $t$  – температура среды, °С.

На основании комплексного анализа динамики миграции зоны наименьшего прогревания и реологических свойств среды в процессе нагревания установлено, что конвективный теплообмен в условиях непрерывно изменяющейся температуры среды представляет собой сложную систему циркуляционных течений, состоящую как минимум из двух тороидальных участков с неправильным сечением (рисунок 4), что согласуется с существующими представлениями [1].

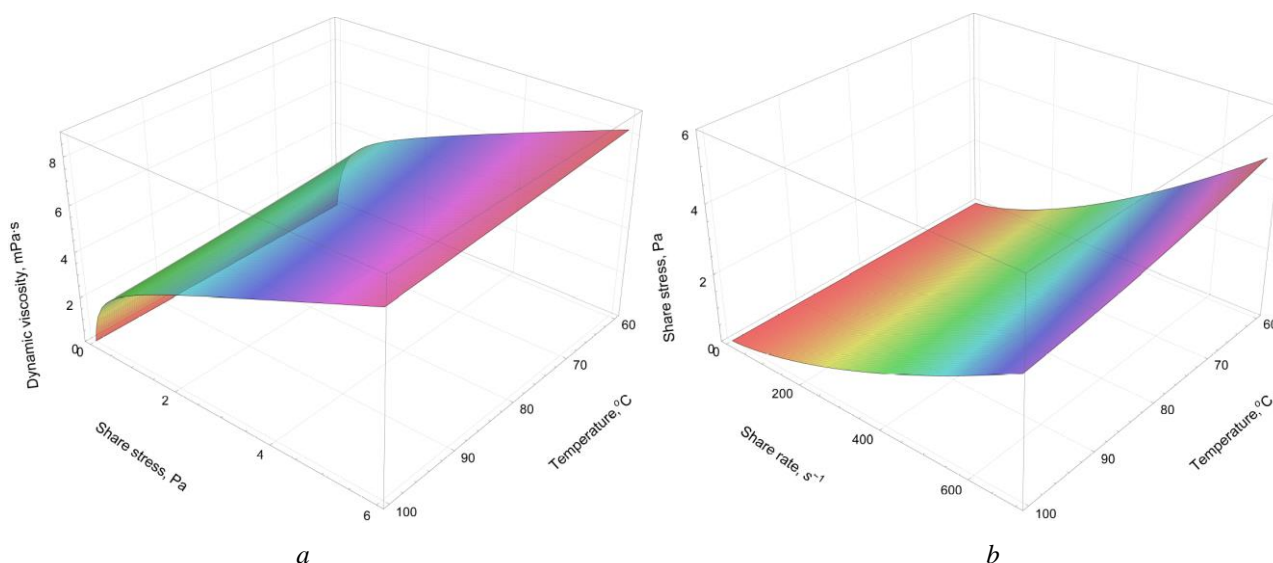


Рисунок 3. Влияние напряжения сдвига и температуры на динамическую вязкость (*a*) и скорости сдвига (Share rate) и температуры на напряжение сдвига (*b*) сока яблочного осветлённого

Figure 3. Effect of shear stress and temperature on dynamic viscosity (*a*) and shear rate (Share rate) and temperature on shear stress (*b*) of clarified apple juice

При этом один участок (I) – пространственно доминирующий, с циркуляционным движением слоёв, определяемым теплообменом преимущественно между средой и боковыми стенками. Динамика циркуляции среды второго

участка (II) определяется особенностями теплообмена с поверхностью дна.

Направления течений взаимодействующих участков комплементарны друг другу в месте контакта.



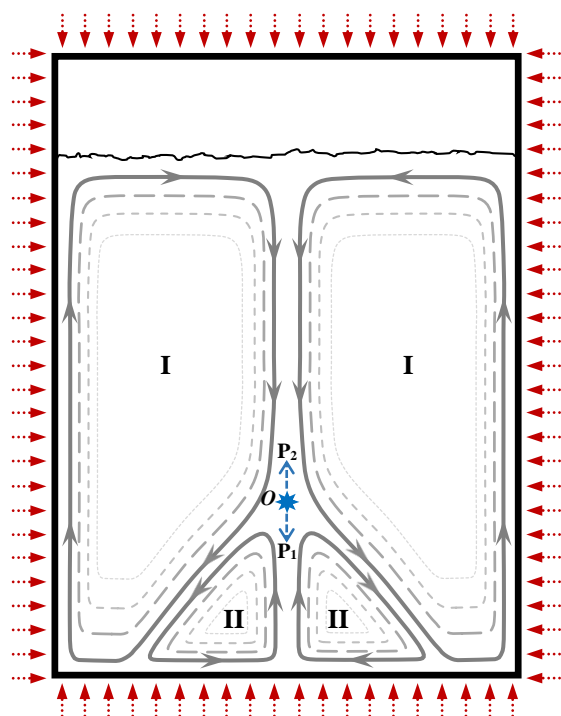


Рисунок 4. Модель динамики факторов, определяющих направленность и выраженность миграции зоны наименьшего прогревания в процессе нагревания

Figure 4. Model of dynamics for factors determining the direction and expression of cold spot migration during heating

Анализ результатов проведённых исследований позволяет предположить следующее. В результате теплообменного процесса вязкость среды снижается, приводя к увеличению интенсивности циркуляции, в то время как увеличение скорости циркуляции неизбежно сопровождается увеличением скорости сдвига, что в некоторой степени тормозит нарастание скорости циркуляции за счёт снижения темпа уменьшения вязкости. В результате происходит миграция зоны наименьшего прогревания вниз по оси сосуда. В некоторый момент времени заметную роль начинает играть второй (минорный) циркуляционный поток с противоположным аксиальным вектором движения потоков. При дальнейшем увеличении температуры вклад минорного потока в формирование динамики миграции зоны наименьшего прогревания также увеличивается.

В некоторый момент времени влияние двух циркуляционных потоков уравнивается и миграция останавливается. При дальнейшем увеличении температуры начальное направление

миграции зоны наименьшего прогревания меняется на противоположное – влияние минорного потока начинает локально превалировать. При дальнейшем увеличении температуры и скорости циркуляций потоков возможно вовлечение в процесс дополнительно образующихся малых циркулирующих потоков и образование локальных зон переходного и турбулентного течения, что ещё более усложнит общую картину.

Постулируя условие необходимости контроля температуры в зоне наименьшего прогревания в процессе термической обработки как фактора, определяющего термоустойчивость спор тест-культур микроорганизмов к интегральному тепловому воздействию, для разработки адекватных режимов термической инактивации необходимо осуществлять контроль температуры в зоне наименьшего прогревания с учётом её миграции.

Поскольку ключевым моментом в данной модели является динамика реологических свойств среды, особенно актуальным исследование в данной области делает введение в состав продукта модификаторов реологических свойств, нелинейно изменяющих целевые свойства продукта и, как следствие, динамику прогреваемости, направленность и выраженность миграции зоны наименьшего прогревания.

### Заключение

При проведении исследований были получены следующие результаты:

- экспериментально установлено наличие миграции зоны наименьшего прогревания в процессе термической обработки однофазных сред с конвективным теплообменом, исследована её кинетика, установлен нелинейный и обратимый характер миграции зоны наименьшего прогревания;

- предложен механизм протекания процесса миграции зоны наименьшего прогревания с учётом динамики реологии нагреваемой среды и взаимодействия конвективных потоков, что в обязательном порядке следует учитывать при разработке режимов термической инактивации однофазных пищевых систем с конвективным теплообменом при использовании в их составе компонентов для модификации реологических свойств продукта с ярко выраженной нелинейностью зависимостей от температуры и скорости сдвига.

## Литература


- 1 Ghani Al-Baali A.G.A., Farid M.A. Sterilization of food in retort pouches. 2006. 205 p.
- 2 Yanniotis S., Sundén B. et al. Heat Transfer in Food Processing: Recent Developments and Applications. 2007. 288 p.
- 3 Durouder J.-P. Heat Transfer in Chemical, Food and Pharmaceutical Industries. 2016. 394 p.
- 4 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 (1). P. 191–195.
- 5 Kumar A., Bhattacharya M. Transient temperature and velocity profiles in a canned non-Newtonian liquid food during sterilization in a still-cook retort // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1991. V. 34 (4–5). P. 1083–1096.
- 6 Zechman L.G., Pflug I.J. Location of the slowest heating zone for natural convection heating fluids in metal containers // *Journal of Food Science*. 1989. V. 54. P. 205–229.
- 7 Augusto P.E.D., Pinheiro T.F., Cristianini M. Using Computational Fluid-Dynamics (CFD) for the evaluation of beer pasteurization: effect of orientation of cans // *Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas*. 2010. V. 30 (4). P. 980–986.
- 8 Augusto P.E.D., Cristianini M. Computational fluid dynamics evaluation of liquid food thermal process in a brick shaped package // *Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas*. 2012. V. 32 (1). P. 134–141.
- 9 Akpek A., Youn Ch., Maeda A., Fujisawa N., Kagawa T. Effect of Thermal Convection on Viscosity Measurement in Vibrational Viscometer // *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*. 2014. V. 2. P. 12–17.
- 10 Boz Z., Uyar R., Erdogdu F. Principles of Canning // *Encyclopedia of Food Microbiology*. 2014. V. 1. P. 160–168.
- 11 Sun D.-W. et al. Thermal Food Processing. New Technologies and Quality Issues: 2nd ed. 2012. 653 p.
- 12 Sandeep K.P. et al. Thermal Processing of Foods. Control and Automation. 2011. 212 p.
- 13 Kannan A., Gourisankar Sandaka P.Ch. Heat transfer analysis of canned food sterilization in a still retort // *Journal of Food Engineering*. 2008. V. 88 (2). P. 213–228.
- 14 Демирова А.Ф., Мурадова М.С. Изучение прогреваемости модельного раствора при различных состояниях банки // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2000. № 8 С. 69–72.
- 15 Бабарин В.П. Стерилизация консервов: справочник. СПб.: ГИОРД, 2006. 312 с.
- 16 Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное руководство. М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства Наука, 1971. 192 с.
- 17 Seltman Y.J. Experimental Design and Analysis. 2014. 414 p.

## References

- 1 Ghani Al-Baali A.G.A., Farid M.A. Sterilization of food in retort pouches. 2006. 205 p.
- 2 Yanniotis S., Sundén B. et al. Heat Transfer in Food Processing: Recent Developments and Applications. 2007. 288 p.
- 3 Durouder J.-P. Heat Transfer in Chemical, Food and Pharmaceutical Industries. 2016. 394 p.
- 4 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. vol. 53 (1). pp. 191–195.
- 5 Kumar A., Bhattacharya M. Transient temperature and velocity profiles in a canned non-Newtonian liquid food during sterilization in a still-cook retort. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1991. vol. 34 (4–5). pp. 1083–1096.
- 6 Zechman L.G., Pflug I.J. Location of the slowest heating zone for natural convection heating fluids in metal containers. *Journal of Food Science*. 1989. vol. 54. pp. 205–229.
- 7 Augusto P.E.D., Pinheiro T.F., Cristianini M. Using Computational Fluid-Dynamics (CFD) for the evaluation of beer pasteurization: effect of orientation of cans. *Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas*. 2010. vol. 30(4). pp. 980–986.
- 8 Augusto P.E.D., Cristianini M. Computational fluid dynamics evaluation of liquid food thermal process in a brick shaped package. *Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas*. 2012. vol. 32 (1). pp. 134–141.
- 9 Akpek A., Youn Ch., Maeda A., Fujisawa N., Kagawa T. Effect of Thermal Convection on Viscosity Measurement in Vibrational Viscometer. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*. 2014. vol. 2. pp. 12–17.
- 10 Boz Z., Uyar R., Erdogdu F. Principles of Canning. *Encyclopedia of Food Microbiology*. 2014. vol. 1. pp. 160–168.
- 11 Sun D.-W. et al. Thermal Food Processing. New Technologies and Quality Issues; 2nd ed. 2012. 653 p.
- 12 Sandeep K.P. et al. Thermal Processing of Foods. Control and Automation. 2011. 212 p.
- 13 Kannan A., Gourisankar Sandaka P. Ch. Heat transfer analysis of canned food sterilization in a still retort. *Journal of Food Engineering*. 2008. vol. 88 (2). pp. 213–228.
- 14 Demirova A.F., Muradova M.S. Study of warm-up for the model solution under different conditions of the can. Storage and processing of agricultural products. 2000. no. 8. pp. 69–72. (in Russian).
- 15 Babarin V.P. Sterilization of canned food: reference book. St. Petersburg, 2006. 312 p. (in Russian).
- 16 Rumshinskii L.Z. Mathematical processing of experiment results: Reference manual. Moscow, 1971. 192 p. (in Russian).
- 17 Seltman Y.J. Experimental Design and Analysis. 2014. 414 p.


## Сведения об авторах

**Владимир В. Кондратенко** к.т.н., доцент, заместитель директора по научной работе, ВНИИТЕК – филиал «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, ул. Школьная, 78, г. Видное, Ленинский район, Московская область, 142703, Россия, nauka@vniitek.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0913-5644>

## Information about authors

**Vladimir V. Kondratenko** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, deputy director for science research, Russian Research Institute of Canning Technology – branch of Gorbatov Federal Research Center for Food Systems at RAS, Scholnaya Str., 78, Vidnoe, Leninsky area, Moscow Region, 142703, Russia, nauka@vniitek.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0913-5644>

**Борис Л. Каневский** к.т.н., ведущий научный сотрудник, лаборатория процессов и оборудования пищевых производств, ВНИИТЕК – филиал «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, ул. Школьная, 78, г. Видное, Ленинский район, Московская область, 142703, Россия, borka5@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9432-4257>

**Галина П. Покудина** старший научный сотрудник, лаборатория процессов и оборудования пищевых производств, ВНИИТЕК – филиал «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, ул. Школьная, 78, г. Видное, Ленинский район, Московская область, 142703, Россия, konservtech@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5692-7839>

**Лидия А. Борченкова** старший научный сотрудник, лаборатория процессов и оборудования пищевых производств, ВНИИТЕК – филиал «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, ул. Школьная, 78, г. Видное, Ленинский район, Московская область, 142703, Россия, borchenkova@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1230-5990>

**Вячеслав И. Сенкевич** старший научный сотрудник, лаборатория процессов и оборудования пищевых производств, ВНИИТЕК – филиал «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, ул. Школьная, 78, г. Видное, Ленинский район, Московская область, 142703, Россия, vnikip@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5684-7006>

**Boris L. Kanevskiy** Cand. Sci. (Engin.), leading researcher, laboratory of processes and equipment for food processing, Russian Research Institute of Canning Technology – branch of Gorbato Federal Research Center for Food Systems at RAS, Scholnaya Str., 78, Vidnoe, Leninsky area, Moscow Region, 142703, Russia, borka5@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9432-4257>

**Galina P. Pokudina** senior researcher, laboratory of processes and equipment for food processing, Russian Research Institute of Canning Technology – branch of Gorbato Federal Research Center for Food Systems at RAS, Scholnaya Str., 78, Vidnoe, Leninsky area, Moscow Region, 142703, Russia, konservtech@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5692-7839>

**Lidiya A. Borchenkova** senior researcher, laboratory of processes and equipment for food processing, Russian Research Institute of Canning Technology – branch of Gorbato Federal Research Center for Food Systems at RAS, Scholnaya Str., 78, Vidnoe, Leninsky area, Moscow Region, 142703, Russia, borchenkova@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1230-5990>

**Vyacheslav I. Senkevich** senior researcher, laboratory of processes and equipment for food processing, Russian Research Institute of Canning Technology – branch of Gorbato Federal Research Center for Food Systems at RAS, Scholnaya Str., 78, Vidnoe, Leninsky area, Moscow Region, 142703, Russia, vnikip@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5684-7006>

#### Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 12/02/2020	После редакции 21/02/2020	Принята в печать 02/03/2020
Received 12/02/2020	Accepted in revised 21/02/2020	Accepted 02/03/2020