

УДК 664.951.6

А.В. Столянов, А.В. Кайченев, А.А. Маслов, А.В. Власов, В.В. Ерещенко

## **Применение моделирования режимов тепловой стерилизации для улучшения показателей качества консервной продукции**

A.V. Stolyanov, A.V. Kaychenov, A.A. Maslov, A.V. Vlasov, V.V. Ereshchenko

### **Application of thermal sterilization regimes simulation for improvement of canned foods quality factors**

**Аннотация.** Описаны результаты сопоставления методов оптимизации температурно-временных режимов тепловой стерилизации. Показано, что с использованием моделирования возможно значительно улучшить показатели качества готовой консервной продукции, уменьшить продолжительность процесса стерилизации и снизить энергозатраты при сохранении требуемого значения фактического стерилизующего эффекта.

**Abstract.** Results of comparison of optimization methods of thermal sterilization temperature-time regimes have been described. It has been shown that due to simulation the final canned foods' quality factors are significantly improved, sterilization process time is decreased and energy consumption is reduced without sacrificing actual final lethality value.

**Ключевые слова:** моделирование, оптимизация, стерилизация, тиамин, стерилизующий эффект  
**Key words:** simulation, optimization, sterilization, thiamine, final lethality

#### **1. Введение**

Тепловая стерилизация консервов, несмотря на давнюю историю, продолжает активно развиваться, а благодаря удобству и длительному сроку хранения останется востребованной и в будущем.

Процесс стерилизации консервов требует нахождения компромисса между полезным и вредным воздействием высоких температур на продукт. С одной стороны, термическая обработка инактивирует споры, микроорганизмы и ферменты, присутствующие в продуктах питания и оказывающие негативное воздействие на здоровье потребителя и сохранность продукции. В то же время снижается концентрация неустойчивых к высокой температуре нутриентов, таких как пищевые белки и витамины (ретинол, тиамин, фолиевая кислота, аскорбиновая кислота, кальциферол и другие) (Durance, 1997; Aubourg, 2001). Поэтому для исследователей является важной задачей нахождение оптимальных температурно-временных режимов тепловой стерилизации, снижающих энергозатраты и продолжительность процесса стерилизации (Кайченев и др., 2012). Такие режимы одновременно сочетают требуемую степень инактивации микроорганизмов (микробиологическую летальность) и увеличение определенных показателей качества продукта (в частности, повышение содержания тиамина).

#### **2. Моделирование режимов тепловой стерилизации**

На сегодняшний день одним из рациональных способов разработки оптимальных температурно-временных режимов тепловой стерилизации является численное моделирование тепловых процессов.

В своей работе Симпсон и др. за основу для оптимизации по содержанию тиамина использовали процесс тепловой стерилизации с постоянной температурой в автоклаве – 118 °С, минимальным необходимым стерилизующим эффектом – 8 усл. мин, продолжительностью стерилизации – 98 мин и содержанием тиамина в конечном продукте – 50 %. Затем с использованием режима с переменной температурой, базового алгоритма случайного поиска, трехкоординатной интерполяции и 1 000 шагов вычислений была решена задача оптимизации по увеличению до максимума содержания тиамина в конечном продукте. В результате продолжительность стерилизации сократилась на 7 мин и составила 91 мин, при этом содержание тиамина повысилось до 55 %. Оптимизированный процесс стерилизации изображен на рис. 1 (Simpson et al., 2008).

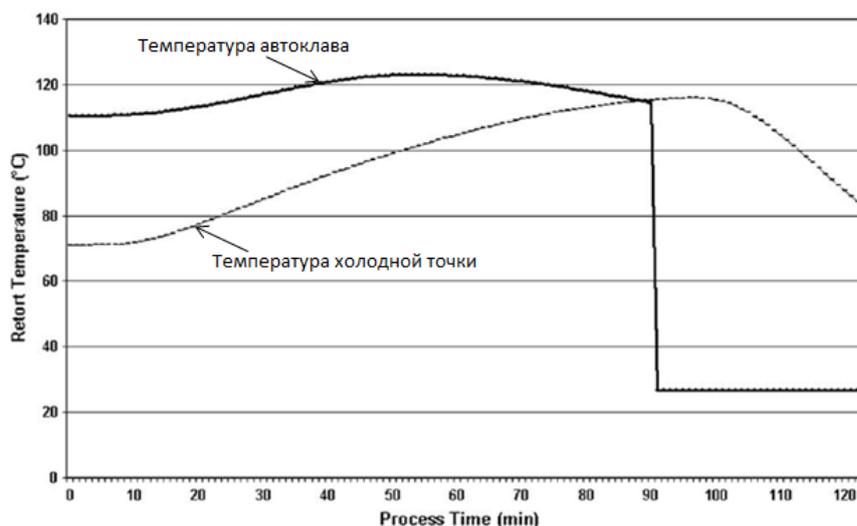


Рис. 1. Процесс стерилизации, оптимизированный Симпсоном по содержанию тиаминa

Для решения задачи по оптимизации времени стерилизации Симпсон и др. использовали режим с постоянной температурой в автоклаве, отличающийся от предыдущего тем, что температура стерилизации была увеличена до 125 °С, содержание тиаминa уменьшилось до 50 %, а продолжительность стерилизации сократилась до 71 мин. Далее с использованием аналогичных действий была решена задача оптимизации по максимальному уменьшению времени стерилизации. В результате вычислений продолжительность процесса стерилизации сократилась до 68 мин, остальные параметры остались неизменными. На рис. 2 изображен процесс, соответствующий вышеуказанным параметрам (Simpson et al., 2008).

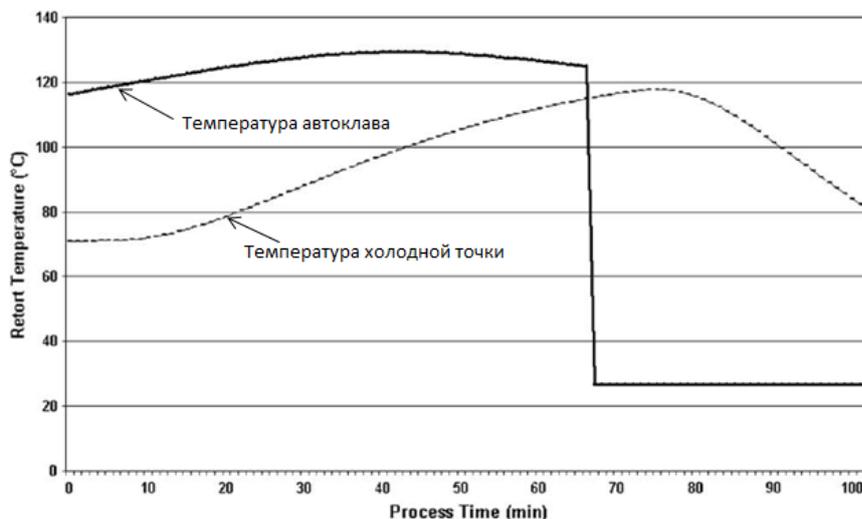


Рис. 2. Процесс стерилизации, оптимизированный Симпсоном по времени стерилизации

Абакаров и др. в своих работах в качестве основы использовали аналогичные процессы тепловой стерилизации, но, в отличие от Симпсона, для оптимизации применялся метод адаптивного случайного поиска (более подробно метод изложен в работе (Столянов и др., 2014)). В первом случае (оптимизация по содержанию тиаминa) стерилизующий эффект равен 8 усл. мин, содержание тиаминa – 55 %, а продолжительность стерилизации сократилась на 9 мин и составила 89 мин (оптимизированный процесс показан на рис. 3). Результатом решения второй задачи оптимизации (по времени стерилизации) стали следующие параметры: продолжительность стерилизации с переменной температурой – 67 мин, содержание тиаминa в конечном продукте – 50,3 % (на рис. 4 изображен соответствующий данным параметрам процесс стерилизации). При этом количество вычислений для решения двух задач оптимизации уменьшилось и составило 600 итераций (Abakarov, 2011; Abakarov et al., 2009).

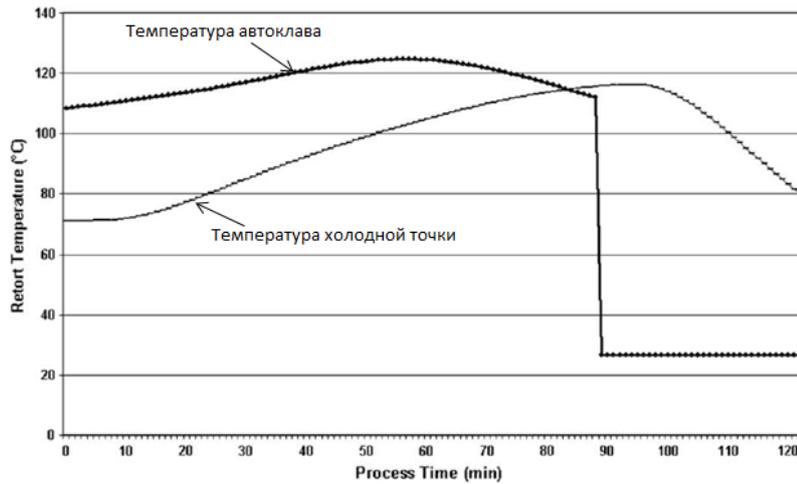


Рис. 3. Процесс стерилизации, оптимизированный Абакаровым по содержанию тиаминa

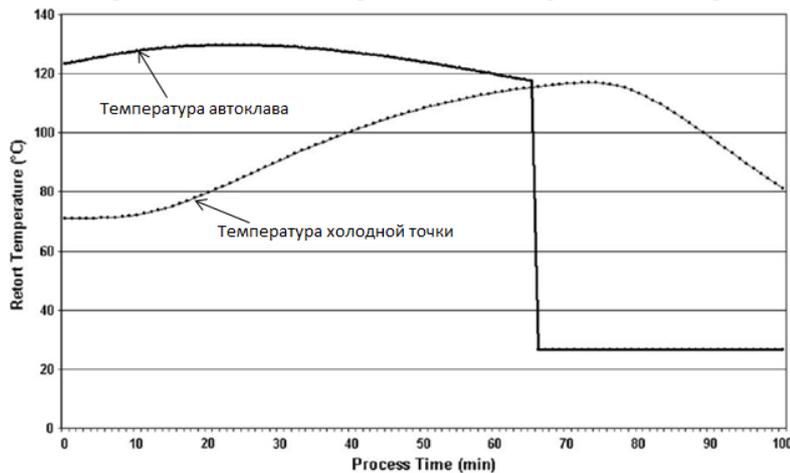


Рис. 4. Процесс стерилизации, оптимизированный Абакаровым по времени стерилизации

Использование программного продукта "OPT-PROx" позволило решить задачу одновременной оптимизации как по содержанию тиаминa, так и по времени стерилизации. В итоге продолжительность стерилизации сократилась до 62 мин при повышении содержания тиаминa до 55 % (полученный процесс стерилизации показан на рис. 5) (Abakarov, 2011).

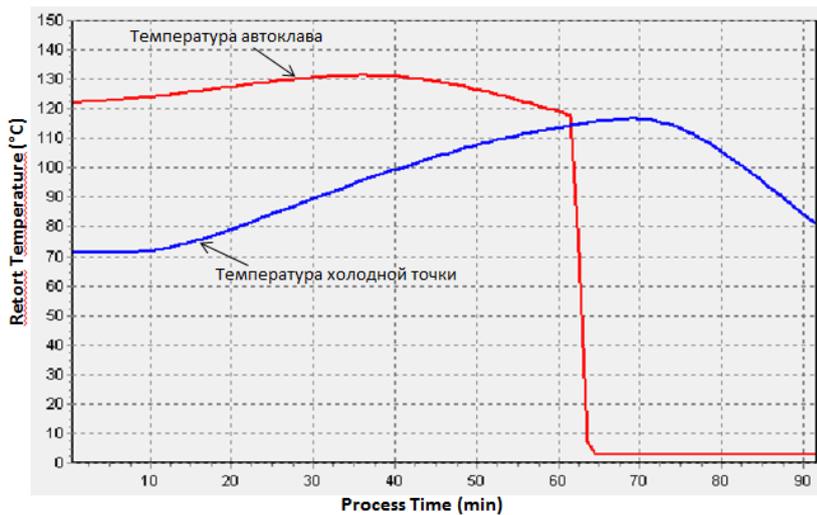


Рис. 5. Процесс стерилизации, оптимизированный в программном продукте "OPT-PROx"

Все выше перечисленные исходные и оптимизированные параметры для сравнения сведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты оптимизации параметров исходных режимов

	Стерилизующий эффект, усл. мин	Время стерилизации, мин	Содержание тиамин, %	Количество итераций
Оптимизация по содержанию тиамин				
Исходные значения параметров	8	98	53	–
Оптимизация (Симпсон)	8	91	55	1 000
Оптимизация (Абакаров)	8	89	55	600
Оптимизация по времени стерилизации				
Исходные значения параметров	8	71	50	–
Оптимизация (Симпсон)	8	68	50	1 000
Оптимизация (Абакаров)	8	67	50,3	600
Оптимизация одновременно по содержанию тиамин и времени стерилизации				
Оптимизация с использованием "ОПТ-PROx" (Абакаров)	8	62	55	20 000

Из табл. 1 видно, что использование Абакаровым метода адаптивного случайного поиска совместно с вариабельным режимом для многоцелевой оптимизации в программном продукте "ОПТ-PROx" дало значительный прирост в результатах по сравнению с оптимизацией по одному параметру. Так, время стерилизации уменьшилось с 62 мин до 67, а содержание тиамин увеличилось с 50,3 % до 55 %. Однако для выполнения процесса стерилизации по характеристикам, представленным на рис. 1-5, необходим специально разработанный регулятор, способный обработать данные профили температур. Это является одним из основных препятствий для реализации заданных режимов в реальном промышленном автоклаве.

Особое внимание уделяют многоцелевой оптимизации – одному из перспективных направлений развития пищевой промышленности не только за рубежом, но и в России.

Научно-исследовательской группой кафедры автоматизации и вычислительной техники (АиВТ) Мурманского государственного технического университета (МГТУ) совместно с кафедрой технологий пищевых производств (ТПП) в 2011 г. был разработан модернизированный способ тепловой стерилизации консервов "Печень трески натуральная" в автоклаве АВК-30М, регулируемым параметром которого является фактический стерилизующий эффект. Используя программу Modern\_Optim, было произведено моделирование традиционного (рис. 6, 8) и модернизированного (рис. 7, 9) способов для двух температурных режимов 115 °С и 120 °С соответственно. Оптимизация выполнялась методом покоординатного спуска по следующим параметрам: температура в стерилизационной камере ( $T_{\text{стр}}$ ); продолжительность этапов собственно стерилизации при повышенной ( $T_{\text{стр}1}$ ) и обычной ( $T_{\text{стр}2}$ ) температурах соответственно. Требуемое значение фактического стерилизующего эффекта ( $L$ ) было выбрано около 6,7 усл. мин. Сравнительные результаты моделирования представлены в табл. 2 (Кайченев и др., 2013).

Таблица 2. Сравнение традиционного и модернизированного способа

	Фактический стерилизующий эффект, усл. мин	Время стерилизации, мин	Потребляемая электроэнергия, кВт·ч	Температура продукта (max), °С
При температуре стерилизации 115 °С				
Традиционный способ	6,75	93,33	3,48	114,6
Модernизированный способ	6,77	83,3	2,49	114,9
При температуре стерилизации 120 °С				
Традиционный способ	6,77	73	3,35	117,2
Модernизированный способ	6,78	85,7	2,73	114,6

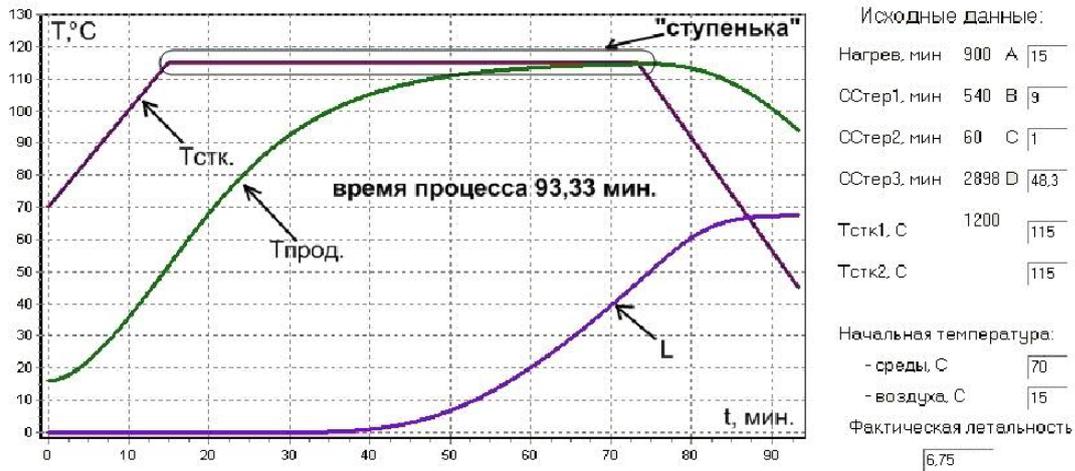


Рис. 6. Моделирование традиционного способа стерилизации при  $T_{стк} = 115\text{ }^{\circ}\text{C}$

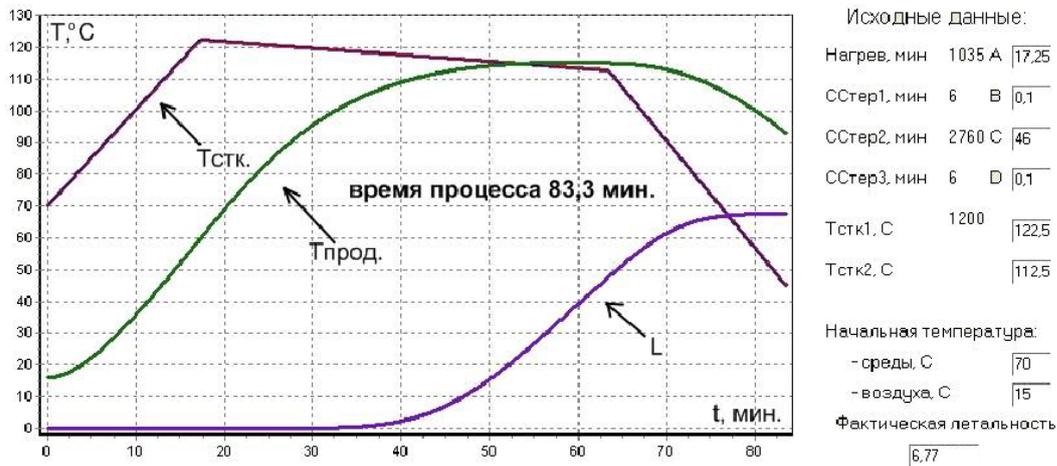


Рис. 7. Моделирование модернизированного способа стерилизации при  $T_{стк} = 122,5-112,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

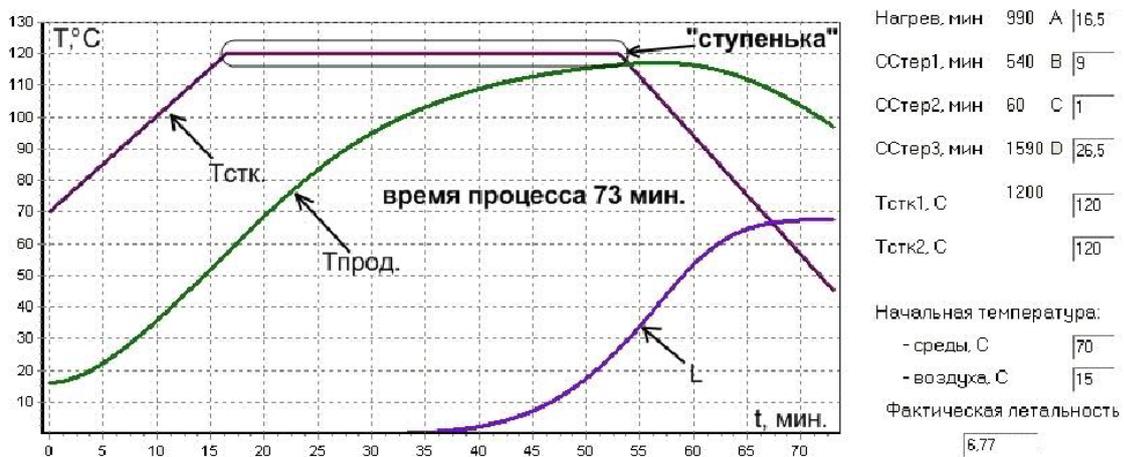


Рис. 8. Моделирование традиционного способа стерилизации при  $T_{стк} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$

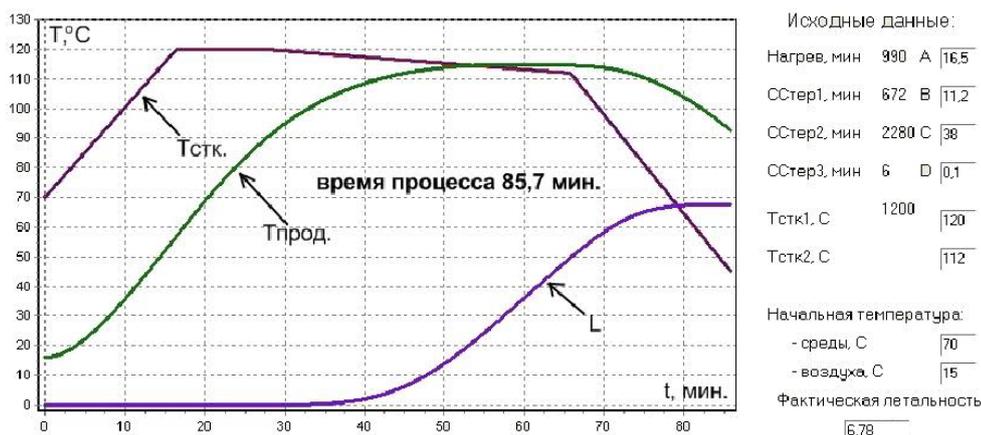


Рис. 9. Моделирование модернизированного способа стерилизации при  $T_{стк} = 120-112\text{ }^{\circ}\text{C}$

Проанализировав табл. 2, можно сказать, что использование модернизированного способа стерилизации дает значительный прирост в результатах по сравнению с традиционным способом лишь в случае стерилизации при температуре  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Так, продолжительность стерилизации уменьшилась с  $93,33$  мин до  $83,3$ , потребляемая электроэнергия стала  $2,49$  кВт·ч вместо  $3,48$  кВт·ч. Однако следует отметить, что при моделировании (рис. 7) температура стерилизационной камеры превышает  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это значит, что необходимо ввести ограничение на максимальную температуру  $T_{стк, макс.} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом ограничении результаты моделирования модернизированного способа стерилизации составили: время стерилизации –  $85$  мин, потребляемая электроэнергия –  $2,79$  кВт·ч.

В ходе проведенных испытаний автоклава АВК-30М было экспериментально подтверждено, что модернизированный способ стерилизации снижает потребление электроэнергии на  $20\%$  и сокращает продолжительность процесса стерилизации на  $9\%$  без снижения качества готовой продукции (Кайченев и др., 2012).

Дальнейшее совершенствование данного способа с использованием переменного режима и оценки степени проварки костных тканей непосредственно в процессе стерилизации является приоритетным направлением исследований научно-исследовательской группы АиВТ МГТУ.

### 3. Заключение

В результате проведенных исследований авторы пришли к выводу, что благодаря процессам моделирования и оптимизации с использованием вычислительной техники удастся значительно сократить разработку новых режимов стерилизации продуктов и ускорить ввод в действие новых стерилизационных установок, повышающих качество конечной продукции, ее безопасность, и при этом обладающих большей энергоэффективностью.

### Литература

- Abakarov A. Thermal food processing computation software. International Congress on Engineering and Food (ICEF 11), 2011. URL: <http://www.icef11.org/content/papers/mcf/MCF012.pdf>.
- Abakarov A., Sushkov Yu., Almonacid S. et al. Thermal processing optimization through a modified adaptive random search. Journal of Food Engineering. 2009. doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.01.013.
- Aubourg S.P. Review: Loss of quality during the manufacture of canned fish products. Food Science and Technology International. 2001. doi: 10.1106/4H8U-9GAD-VMG0-3GLR.
- Durance T.D. Improving canned food quality with variable retort temperature processes. Trends in Food Science & Technology. 1997. doi: 10.1016/S0924-2244(97)01010-8.
- Simpson R., Abakarov A., Teixeira A. Variable retort temperature optimization using adaptive random search techniques. Food Control. 2008. doi: 10.1016/j.foodcont.2007.10.010.
- Кайченев А.В., Власов А.В., Власова А.Р. и др. Сопоставление модернизированного и традиционного способов стерилизации консервов. Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 560-565.
- Кайченев А.В., Маслов А.А., Власов А.В. и др. Оптимизация процесса стерилизации консервов в водной среде в автоклаве АВК-30М. Вестник МГТУ. 2012. Т. 15, № 1. С. 49-53.
- Столянов А.В., Кайченев А.В., Маслов А.А. и др. Обзор методов многоцелевой оптимизации термической обработки продуктов // Перспективы развития науки и образования: сб. науч. тр. по мат. междун. науч.-практ. конф., М., 2014. Ч. III. С. 17-22.

## References

- Abakarov A.** Thermal food processing computation software. International Congress on Engineering and Food (ICEF 11), 2011. URL: <http://www.icef11.org/content/papers/mcf/MCF012.pdf>.
- Abakarov A., Sushkov Yu., Almonacid S. et al.** Thermal processing optimization through a modified adaptive random search. Journal of Food Engineering. 2009. doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.01.013.
- Aubourg S.P.** Review: Loss of quality during the manufacture of canned fish products. Food Science and Technology International. 2001. doi: 10.1106/4H8U-9GAD-VMG0-3GLR.
- Durance T.D.** Improving canned food quality with variable retort temperature processes. Trends in Food Science & Technology. 1997. doi: 10.1016/S0924-2244(97)01010-8.
- Simpson R., Abakarov A., Teixeira A.** Variable retort temperature optimization using adaptive random search techniques. Food Control. 2008. doi: 10.1016/j.foodcont.2007.10.010.
- Kaychenov A.V., Vlasov A.V., Vlasova A.R. i dr.** Sopotavlenie modernizirovannogo i tradicionnogo sposobov sterilizacii konservov [Comparison of modern and traditional canned food sterilization methods]. Vestnik MGTU. 2013. V. 16, N 3. P. 560-565.
- Kaychenov A.V., Maslov A.A., Vlasov A.V. i dr.** Optimizatsiya protsessa sterilizatsii konservov v vodnoy srede v avtoklave AVK-30M [Optimization of the sterilization process of canned food in water in the AVK-30M autoclave]. Vestnik MGTU. 2012. V. 15, N 1. P. 49-53.
- Stolyanov A.V., Kaychenov A.V., Maslov A.A. i dr.** Obzor metodov mnogocelevoy optimizacii termicheskoy obrabotki produktov [Review of multi-objective optimization methods of thermal processing products]. Perspektivy razvitiya nauki i obrazovaniya: sb. nauch. tr. po mat. mezhdun. nauch.-praktich. konf. M., 2014. Ch. III. P. 17-22.

## Информация об авторах

**Столянов Александр Вячеславович** – Морская академия МГТУ, кафедра автоматике и вычислительной техники, аспирант, ассистент кафедры, e-mail: alendr14@gmail.com

**Stolyanov A.V.** – MSTU Marine Academy, Department of Automation and Computer Engineering, Ph.D. Student, Junior Member of Teaching Staff, e-mail: alendr14@gmail.com

**Кайченев Александр Вячеславович** – Морская академия МГТУ, кафедра автоматике и вычислительной техники, канд. техн. наук, стар. науч. сотрудник, e-mail: ican2005@yandex.ru

**Kaychenov A.V.** – MSTU Marine Academy, Department of Automation and Computer Engineering, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher, e-mail: ican2005@yandex.ru

**Маслов Алексей Алексеевич** – Морская академия МГТУ, профессор кафедры автоматике и вычислительной техники, канд. техн. наук, e-mail: maslova@mstu.edu.ru

**Maslov A.A.** – MSTU Marine Academy, Department of Automation and Computer Engineering, Cand. of Tech. Sci., Professor, e-mail: maslova@mstu.edu.ru

**Власов Александр Валентинович** – Морская академия МГТУ, кафедра автоматике и вычислительной техники, канд. техн. наук, стар. науч. сотрудник, e-mail: ican2005@yandex.ru

**Vlasov A.V.** – MSTU Marine Academy, Department of Automation and Computer Engineering, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher, e-mail: ican2005@yandex.ru

**Ерещенко Виктор Валерьевич** – Морская академия МГТУ, кафедра автоматике и вычислительной техники, аспирант, ассистент кафедры, e-mail: red.err404@gmail.com

**Ereshchenko V.V.** – MSTU Marine Academy, Department of Automation and Computer Engineering, Ph.D. Student, Junior Member of Teaching Staff, e-mail: red.err404@gmail.com