

Научная статья/Research Article

УДК 664.8.036.3

DOI: 10.36718/1819-4036-2022-6-171-179

Владимир Владимирович Кондратенко¹, Наталья Евгеньевна Посокина²,
Анна Ивановна Захарова^{3✉}

^{1,2,3}Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, Видное, Московская область, Россия

¹nauka@vniitek.ru

²technol@vniitek.ru

³zakharova@vniitek.ru

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОНСЕРВОВ В ТУННЕЛЬНОМ ПАСТЕРИЗАТОРЕ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ СОБСТВЕННОЙ ПАСТЕРИЗАЦИИ

Цель исследования – разработка алгоритма расчета режимов пастеризации пищевых продуктов в туннельных пастеризаторах непрерывного действия при постоянной температуре собственно пастеризации, с учетом неоднородности сечения теплового поля по профилю конвейера, для обеспечения минимального воздействия термической обработки на продукт и максимального сохранения питательных свойств продукта. Работу проводили на пастеризаторе туннельного типа ПТТ-01 (Кубаньпищепром). Длина пастеризатора – 25000 мм, скорость ленты – 0,5–1,5 м/мин, ширина ленты – 2743 мм. Температуру внутри продукта в наименее прогреваемой зоне (геометрический центр банки по вертикальной оси) измеряли с помощью многоканальной многофункциональной системы измерения TrackSense (производитель ELLAB A\S, Дания) и датчиков температуры типа Pro. Упакованный продукт с датчиками располагали по ширине транспортной ленты на равном расстоянии (~450 мм) друг от друга. Температура в зоне нагрева – 70 ± 1 – 80 ± 1 °С, в зоне пастеризации – 97 ± 1 °С, в зоне охлаждения – 80–60 – 40–20 °С. В результате экспериментальных исследований процесса пастеризации были установлены интервалы температур для каждой скорости, при которых осуществлялся наиболее интенсивный нагрев, были определены фактические летальности с учетом минимальной термической нагрузки. Определение зависимости фактической летальности от скорости движения транспортной ленты позволило найти область значений скорости ленты, удовлетворяющих заданным условиям, обеспечивающим качество и безопасность готового продукта. В результате проведенной работы был разработан алгоритм расчета скорости транспортной ленты пастеризатора при постоянной температуре собственной пастеризации и описаны последовательные операции.

Ключевые слова: алгоритм расчета, пастеризация, термическая обработка, туннельный пастеризатор, фактическая летальность

Для цитирования: Кондратенко В.В., Посокина Н.Е., Захарова А.И. Алгоритм расчета режима термической обработки консервов в туннельном пастеризаторе при постоянной температуре собственной пастеризации // Вестник КрасГАУ. 2022. № 6. С. 171–179. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-6-171-179.

Vladimir Vladimirovich Kondratenko¹, Natalya Evgenievna Posokina², Anna Ivanovna Zakharova^{3✉}

^{1,2,3}All-Russian Research Institute of Canning Technology – a branch of the Federal Scientific Center for Food Systems named after V.M. Gorbатов RAS, Vidnoe, Moscow Region, Russia

¹nauka@vniitek.ru

²technol@vniitek.ru

³zakharova@vniitek.ru

ALGORITHM TO CALCULATE CANNED FOOD THERMAL TREATMENT MODE IN A TUNNEL PASTEURIZER AT OWN PASTEURIZATION' CONSTANT TEMPERATURE

The purpose of the study is to develop an algorithm for calculating the modes of pasteurization of food products in tunnel pasteurizers of continuous operation at a constant temperature of the actual pasteurization, taking into account the heterogeneity of the thermal field cross section along the conveyor profile, to ensure the minimum effect of heat treatment on the product and maximize the preservation of the nutritional properties of the product. The work was carried out on a tunnel-type pasteurizer PTT-01 (Kubanpishcheprom). The pasteurizer length is 25000 mm, the belt speed is 0.5–1.5 m/min, the belt width is 2743 mm. The temperature inside the product in the least heated zone (the geometric center of the jar along the vertical axis) was measured using a TrackSense multichannel multifunctional measurement system (ELLAB AIS, Denmark) and Pro-type temperature sensors. The packaged product with sensors was placed along the width of the conveyor belt at an equal distance (~450 mm) from each other. The temperature in the heating zone is $70 \pm 1 - 80 \pm 1$ °C, in the pasteurization zone – 97 ± 1 °C, in the cooling zone – $80 - 60 - 40 - 20$ °C. As a result of experimental studies of the pasteurization process, the temperature intervals for each speed were established, at which the most intensive heating was carried out, the actual lethality was determined, taking into account the minimum thermal load. Determining the dependence of actual lethality on the speed of the conveyor belt made it possible to find the range of values of the belt speed that satisfies the specified conditions, ensuring the quality and safety of the finished product. As a result of the work carried out, an algorithm for calculating the speed of the pasteurizer conveyor belt at a constant temperature of its own pasteurization was developed and sequential operations were described.

Keywords: calculation algorithm, pasteurization, heat treatment, tunnel pasteurizer, actual lethality

For citation: Kondratenko V.V., Posokina N.E., Zakharova A.I. Algorithm to calculate canned food thermal treatment mode in a tunnel pasteurizer at own pasteurization' constant temperature // Bulliten KrasSAU. 2022;(6): 171–179. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2022-6-171-179.

Введение. Пастеризация – это «мягкая» термическая обработка, направленная на уничтожение патогенных микроорганизмов, вызывающих порчу продукта, и инактивацию нежелательных ферментов для обеспечения безопасности пищевых продуктов [1]. На характеристики, определяющие качество пищевых продуктов, значительным образом влияет способ обработки пищевых продуктов [2, 3]. Ключом к удовлетворению требований потребителей и повышению конкурентоспособности является предоставление безопасных, высококачественных продуктов, максимально приближенных по характеристикам к свежим фруктам и овощам [4]. Предприятия пищевой промышленности ищут такие методы обработки, которые смогли бы обеспечить срок годности пищевых продуктов, не влияя на их качество и безопасность [5]. При пастеризации продукт нагревается до температуры ниже 100 °C, что считается относительно «мягкой» термической обработкой. В продуктах с низкой кислотностью ($pH > 4,5$) пастеризация используется для продления срока годности пищевых продуктов на несколько дней. В продуктах с $pH < 4,5$ пастеризация продлева-

ет срок годности на несколько месяцев за счет уничтожения микроорганизмов, вызывающих порчу продукта (дрожжи или плесень), и (или) инактивации ферментов [6, 7]. Туннельный пастеризатор, предназначенный для термической обработки укупоренного продукта в потоке, является одним из самых распространенных. В зависимости от конструктивных особенностей пастеризатора пастеризация продукта может осуществляться при заданной постоянной температуре, при этом продолжительность нахождения продукта в каждой зоне задается скоростью движения транспортной ленты. И наоборот, скорость движения ленты – постоянна, а температура в каждой зоне – переменна [8].

Цель исследования – разработка алгоритма расчета режимов пастеризации пищевых продуктов в туннельных пастеризаторах непрерывного действия при постоянной температуре собственно пастеризации.

Задачи:

– исходя из физико-химических характеристик, провести расчет требуемой летальности продукта;

– провести прогревы продукта при разных скоростях движения транспортерной ленты пастеризатора с использованием контрольной аппаратуры;

– рассчитать фактическую летальность с учетом минимальной термической нагрузки и статистических выбросов;

– рассчитать область значений скорости транспортерной ленты пастеризатора, удовлетворяющей условию $F_{\text{факт}} \geq F_{\text{треб}}$;

– использовать полученные данные для разработки алгоритма расчета режимов пастеризации.

Объекты и методы. Работу проводили на пастеризаторе туннельного типа ПТТ-01 (Кубаньпищепром). Длина пастеризатора – 25 000 мм, скорость ленты – 0,5–1,5 м/мин, ширина ленты – 2 743 мм. Зона 1 (предварительный нагрев, температура 70–80 °С) – 500 мм. Зона 2 (зона пастеризации 3-й секции по 4 000 мм, температура 95–98 °С) – 12 000 мм. Зона 3 (зона охлаждения 4-й секции по 3000 мм, температура 80–20 °С) – 12 000 мм. Температуру подачи воды на охлаждение 16–18 °С. Температуру внутри продукта в наименее прогреваемой зоне измеряли с помощью многоканальной многофункциональной системы измерения TrackSense (производитель ELLAB A\S, Дания) и датчиков температуры типа Pro (стандартный гибкий тефлоновый, 2 измерительных канала) 603123 (логгер 1 и 2), 603125 (логгер 3 и 4), 60309 (логгер 5 и 6), с диапазоном измерений от -100 до 140 °С. Измерительные каналы располагали внутри банки с продуктом, фиксируя их на определенной высоте. Упакованный продукт с датчиками располагали по ширине транспортерной ленты на равном расстоянии (~450 мм) друг от друга. Температура в зоне нагрева (70±1–80±1) °С, в зоне пастеризации (97±1) °С, в зоне охлаждения (80– 60–40–20) °С. Для обработки данных использовали считывающую станцию Track Sense PRO 3.1G (645246). Математическую обработку проводили с использованием Table Curve 2D v.5.01 (SYSTAT Software Inc.), MS Excel 2010.

Результаты и их обсуждение. Расчет режимов пастеризации осуществлялся с целью гарантированного достижения промышленной стерильности обрабатываемого продукта, поэтому в качестве основного граничного условия принимали следующее:

$$F_{\text{факт}} \geq F_{\text{треб.}}$$

где $F_{\text{факт}}$ – фактическая летальность, определяемая на основе кинетики прогреваемости продукта, мин; $F_{\text{треб}}$ – требуемая летальность, определяемая микробиологическими методами на основе кинетики гибели тест-культуры микроорганизмов в среде, имитирующей обрабатываемую, мин.

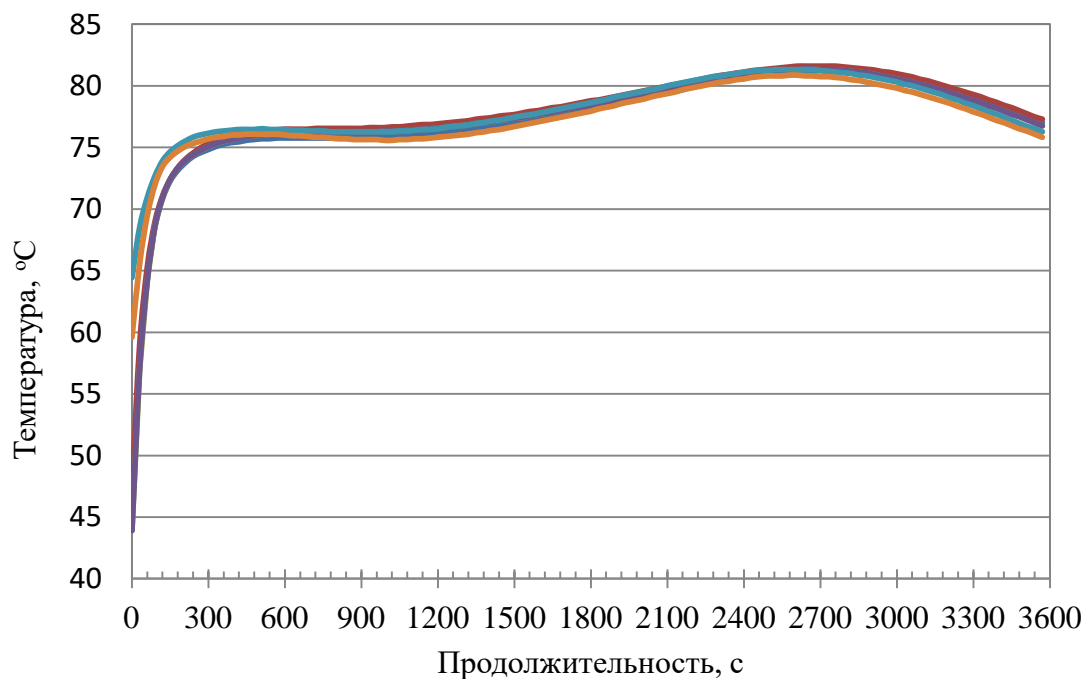
В случае с пастеризацией в теплообменнике туннельного типа, с фиксированной температурой собственной пастеризации, вариативность теплового взаимодействия определялась скоростью движения конвейера. В этой связи подход к определению режимов пастеризации в данных условиях необходимо проводить с учетом неоднородности сечения теплового поля по профилю конвейера.

При расчете фактической летальности, исходя из физико-химических показателей исследуемого пищевого продукта, определяли следующие параметры: $F_{\text{тр}}$ – требуемая летальность; $T_{\text{реф}}$ – температура, принятая в качестве базисной; z – температурный параметр термостойчивости микроорганизмов.

Для исследуемого продукта были взяты следующие параметры: $F_{\text{тр}} = 10$ мин, $T_{\text{реф}} = 85$ °С, $z = 8,3$ [9].

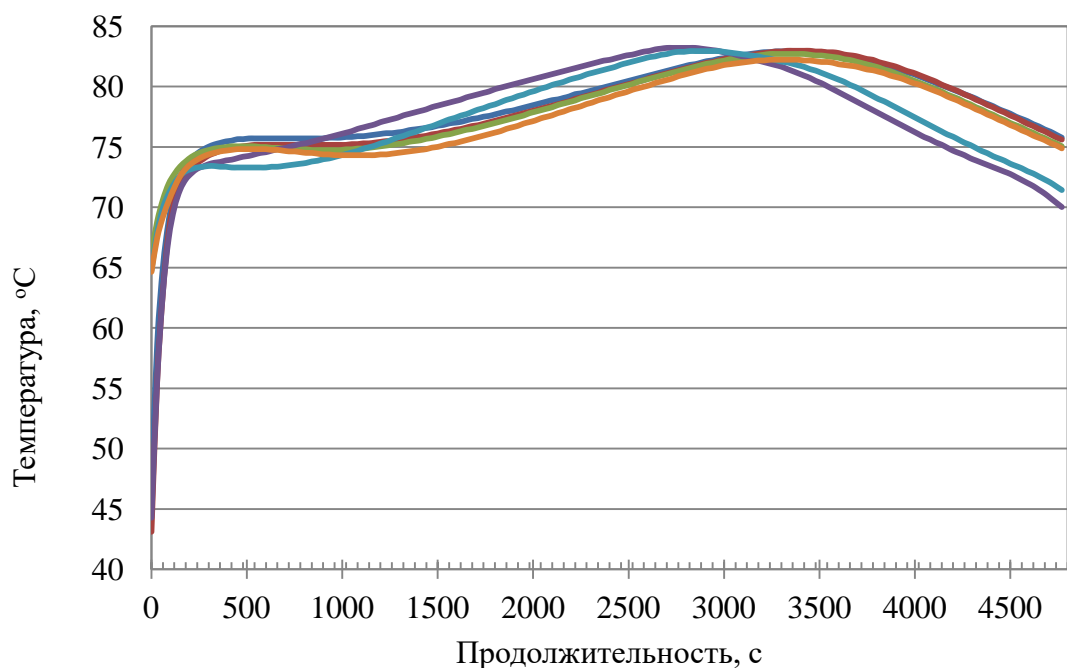
После определения требуемой летальности были проведены прогревы продукта в пастеризаторе при различной скорости движения транспортерной ленты (0,25; 0,3; 0,4 м/мин).

На рисунках 1–3 представлены графики изменения температуры продукта от продолжительности пастеризации при заданных скоростях.



— Логгер 1 — Логгер 2 — Логгер 3 — Логгер 4 — Логгер 5 — Логгер 6

Рис. 1. Зависимость температуры продукта от продолжительности пастеризации при скорости движения транспортной ленты $v = 0,4$ м/мин



— Логгер 1 — Логгер 2 — Логгер 3 — Логгер 4 — Логгер 5 — Логгер 6

Рис. 2. Зависимость температуры продукта от продолжительности пастеризации при скорости движения транспортной ленты $v = 0,3$ м/мин

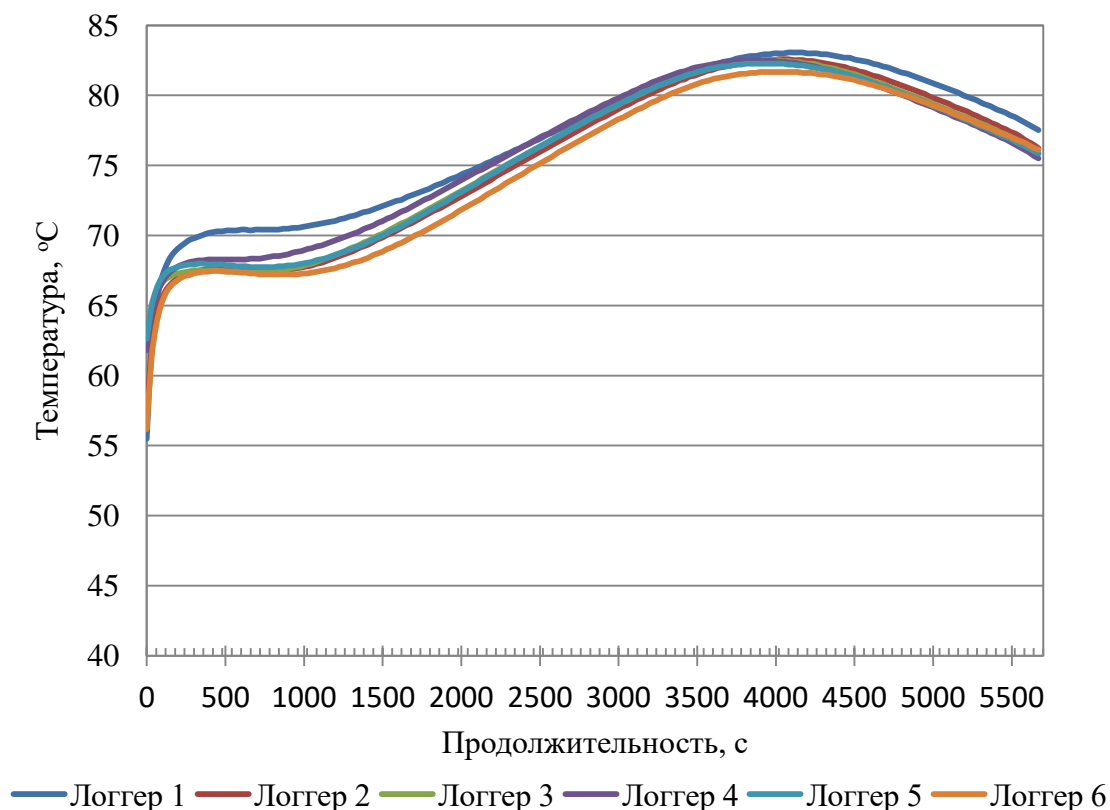


Рис. 3. Зависимость температуры продукта от продолжительности пастеризации при скорости движения транспортной ленты $v = 0,25$ м/мин

Из графиков зависимости температуры видно, что для скорости 0,25 м/мин наиболее интенсивный нагрев осуществлялся в интервале температур 70–83 °С, для скорости 0,3 м/мин – от 75 до 83 °С, а для скорости 0,4 м/мин – от 76 до 83 °С. Оценивая фактическую летальность для каждого из логгеров и для каждого варианта скорости из-за значительной разнородности по профилю конвейера при разных скоростях, возникла необходимость включить в рассмотрение статистический аппарат.

Значение фактической летальности рассчитывали по формуле [10, 11]

$$F_{T_{реф}}^z = \int_{T_{кон}}^{T_{нач}} 10^{\frac{T_{пр}-T_{реф}}{z}} dT_{пр}, \quad (1)$$

где $T_{реф}$ – температура, принятая в качестве базисной; $T_{пр}$ – температура продукта, для которого вычисляют величину. Данные по фактической летальности приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения фактической летальности, мин

Скорость движения транспортной ленты, м/мин	Номер логгера					
	1	2	3	4	5	6
0,40	9,831	11,180	10,785	10,260	10,428	8,921
0,30	18,420	17,687	16,481	17,305	16,119	14,590
0,25	20,011	16,553	16,319	16,702	15,757	13,525

В каждый момент времени t_i определяли температурную нагрузку по формуле

$$q_i = \frac{t_i + t_{i-1}}{2} \cdot (\tau_i - \tau_{i-1}). \quad (2)$$

$$q_0 = 0.$$

Суммарная температурная нагрузка в процессе обработки при постоянной скорости

$$Q_j = \sum_{i=1}^n q_i. \quad (3)$$

Среднее значение суммарной температурной нагрузки Q_{cp} рассчитывали по формуле из $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$, а дельту – по формуле

$$\pm \Delta = t_{(0,05;m-1)} \cdot \frac{S}{\sqrt{m}}, \quad (4)$$

где S – стандартное отклонение; m – количество логгеров.

Затем определяли верхнюю и нижнюю границу среднего значения суммарной температурной нагрузки:

$$Q_{cp}^e = Q_{cp} + \Delta. \quad (5)$$

$$Q_{cp}^H = Q_{cp} - \Delta. \quad (6)$$

Установили граничные условия, при которых оставляли только те суммарные нагрузки, которые удовлетворяли условию $Q_{cp}^H \leq Q_j \leq Q_{cp}^e$, из отобранных Q_j определяли логгер, для которого температурная нагрузка была минимальной.

По данным этого логгера при заданной скорости определяли $F_{факт}$ на момент окончания обработки.

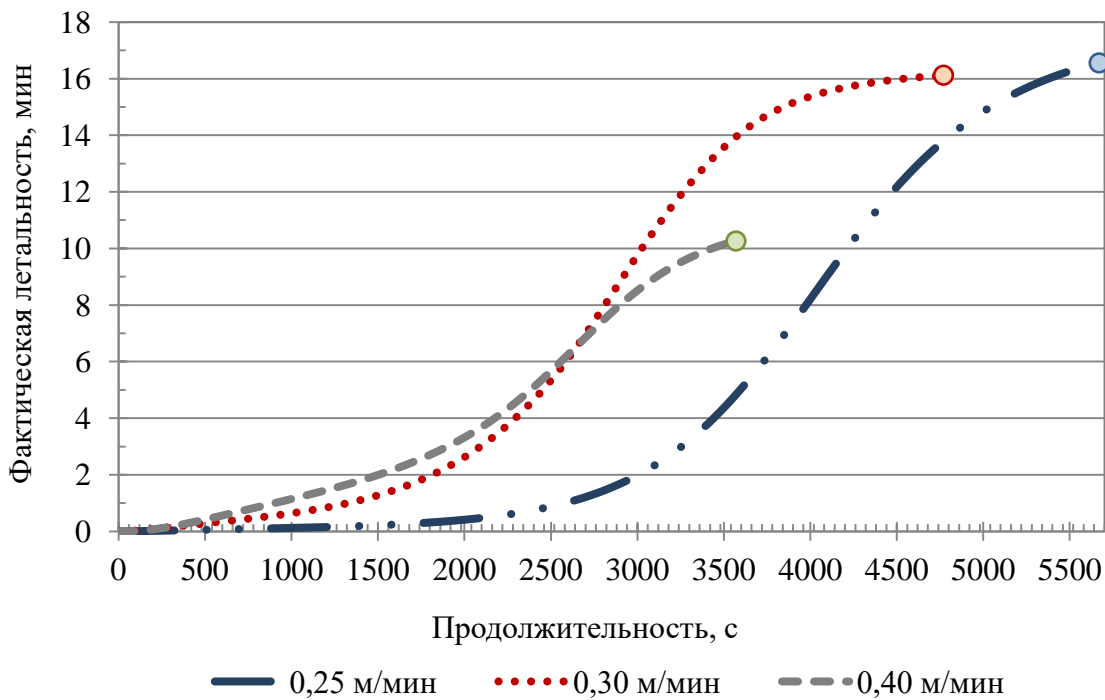


Рис. 4. График изменения фактической летальности с учетом термической нагрузки

Значения фактической летальности с учетом статистических выбросов, мин

Скорость движения транспортерной ленты, м/мин	Фактическая летальность
0,40	10,260
0,30	16,119
0,25	16,553

Для точного расчета данной величины на основе полученных данных была найдена функция, адекватно аппроксимирующая результаты.

Функция имела вид

$$F = F_0 - \left(\frac{v}{v_{opt}} \right)^p, \quad (7)$$

где $F_0 = a; v_{opt} = b; p = c$.

Значения коэффициентов a, b, c приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значение коэффициентов

Коэффициент	Значение	Стандартное отклонение
a	16.67042281	8.41205e-12
b	0.321693167	5.96817e-13
c	8.527800107	6.73306e-11

Построив график зависимости фактической летальности от скорости движения транспортерной ленты (рис. 5), находим область значений скорости ленты, удовлетворяющих заданным условиям. При этом максимальное значе-

ние скорости ленты начинается с 0,385 м/мин и ниже (область значений скорости ленты, удовлетворяющих набору фактической летальности, выделена голубым цветом).

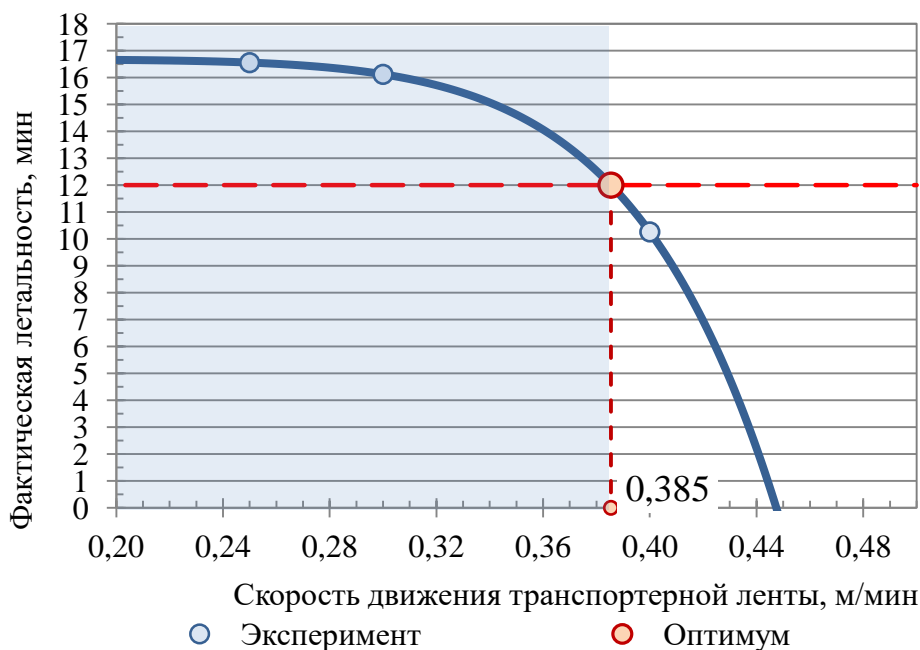


Рис. 5. Зависимость фактической летальности консервов от скорости транспортерной ленты

Заключение. На основании проведенной работы был выработан алгоритм расчета скорости транспортной ленты пастеризатора при постоянной температуре собственной пастеризации. Данный алгоритм состоит из последовательных операций.

1. Расчет требуемой летальности исходя из физико-химических и других характеристик продукта.

2. Прогревы продукта при разных скоростях движения транспортной ленты пастеризатора с использованием датчиков контроля температуры внутри банки в наименее прогреваемой зоне.

3. Расчет фактической летальности для каждого исследуемого случая.

4. Определение фактической летальности с учетом минимальной термической нагрузки и статистических выбросов.

5. Нахождение функции, адекватно аппроксимирующей данные зависимости фактической летальности от скорости движения транспортной ленты пастеризатора.

6. Построение графика зависимости фактической летальности от скорости движения транспортной ленты и нахождение области значений скорости, удовлетворяющей условию $F_{\text{факт}} \geq F_{\text{треб}}$.

Список источников

1. *Lopes R.P., Mota M.J., Delgadillo I., Saraiva J.A.* Pasteurization: Effect on Sensory Quality and Nutrient Composition // *Encyclopedia of Food and Health*. 2016. P. 246–263.
2. *Priyadarshini A., Rajauria G., O'Donnell C.P., Tiwari B.K.* Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. № 59. P. 3082–3101.
3. Влияние низкотемпературной тепловой обработки на жирнокислотный состав и карбонильные соединения в мясе индейки, упакованном под вакуумом / *В.В. Насонова [и др.]* // *Все о мясе*. 2020. № 4. С. 42.
4. *Katiyo W., Yang R., Zhao W.J.* Effects of combined pulsed electric fields and mild temperature pasteurization on microbial inactivation and physicochemical properties of cloudy red apple juice (*Malus pumila* Niedzwetzkyana (Dieck)) // *Journal of Food Safety*. 2017. № 37 (4). P. e12369.

5. *Peng J., Tang J., Barrett D.M., Sablani S.S., Anderson N., Powers J.R.* Thermal pasteurization of ready-to-eat foods and vegetables: Critical factors for process design and effects on quality // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017. № 57 (14). P. 2970–2995.
6. *Deak T.* Chapter 17 – Thermal Treatment // *Food Safety Management*. 2014. P. 423–442.
7. *Featherstone S.* Microbiology of canned foods // *A Complete Course in Canning and Related Processes*. 2015. № 2. P. 3–25.
8. *Ramesh M.N.* Handbook of Food Preservation. 2007.
9. *Tucker G., Featherstone S.* Essentials of Thermal Processing. 2011.
10. *Friso D.* A New Mathematical Model for Food Thermal Process Prediction // *Modelling and Simulation in Engineering*. 2013. P. 1–8.
11. Миграция зоны наименьшего прогревания в гетерофазной модельной пищевой системе при стерилизации / *В.В. Кондратенко* // *Вестник КрасГАУ*. 2021. № 11. С. 188–197.

References

1. *Lopes R.P., Mota M.J., Delgadillo I., Saraiva J.A.* Pasteurization: Effect on Sensory Quality and Nutrient Composition // *Encyclopedia of Food and Health*. 2016. P. 246–263.
2. *Priyadarshini A., Rajauria G., O'Donnell C.P., Tiwari B.K.* Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. № 59. P. 3082–3101.
3. Vliyanie nizkotemperaturnoj teplovoj obrabotki na zhirkokislотноy sostav i karbonil'nye soedineniya v myase indejki, upakovannom pod vakuumom / *V.V. Nasonova [i dr.]* // *Vse o myase*. 2020. № 4. S. 42.
4. *Katiyo W., Yang R., Zhao W.J.* Effects of combined pulsed electric fields and mild temperature pasteurization on microbial inactivation and physicochemical properties of cloudy red apple juice (*Malus pumila* Niedzwetzkyana (Dieck)) // *Journal of Food Safety*. 2017. № 37 (4). P. e12369.
5. *Peng J., Tang J., Barrett D.M., Sablani S.S., Anderson N., Powers J.R.* Thermal pasteuriza-

- tion of ready-to-eat foods and vegetables: Critical factors for process design and effects on quality // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017. № 57 (14). P. 2970–2995.
6. *Deak T.* Chapter 17 – Thermal Treatment // *Food Safety Management*. 2014. P. 423–442.
 7. *Featherstone S.* Microbiology of canned foods // *A Complete Course in Canning and Related Processes*. 2015. № 2. P. 3–25.
 8. *Ramesh M.N.* Handbook of Food Preservation. 2007.
 9. *Tucker G., Featherstone S.* Essentials of Thermal Processing. 2011.
 10. *Friso D.* A New Mathematical Model for Food Thermal Process Prediction // *Modelling and Simulation in Engineering*. 2013. P. 1–8.
 11. Migraciya zony naimen'shego progrevaniya v geterofaznoj model'noj pischevoj sisteme pri sterilizacii / *V.V. Kondratenko* // *Vestnik KrasGAU*. 2021. № 11. S. 188–197.

Статья принята к публикации 14.03.2022 / The article accepted for publication 14.03.2022.

Информация об авторах:

Владимир Владимирович Кондратенко¹, заместитель директора по науке, кандидат технических наук

Наталья Евгеньевна Посокина², заведующая лабораторией технологии консервирования, кандидат технических наук

Анна Ивановна Захарова³, старший научный сотрудник лаборатории технологии консервирования

Information about the authors:

Vladimir Vladimirovich Kondratenko¹, Deputy Director for Science, Candidate of Technical Sciences

Natalya Evgenievna Posokina², Head of the Laboratory of Canning Technology, Candidate of Technical Sciences

Anna Ivanovna Zakharova³, Senior Researcher, Laboratory of Canning Technology

