

РАЗДЕЛ I. ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 664. 8.037.5

В.А. Грибкова, Е.В. Семенов, А.А. Славянский, Н.В. Николаева
V.A. Gribkova, E.V. Semionov, A.A. Slavyansky, N.V. Nikolayeva

К РАСЧЕТУ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ МЯСА ПТИЦЫ В УПАКОВКЕ

ON THE CALCULATION OF THE COOLING PROCESS OF POULTRY MEAT IN PACKAGING

Аннотация:

Одним из наиболее распространенных в настоящее время способов хранения мяса птицы является упаковка в полиэтиленовую пленку. Упаковка из пленки легка и удобна при перевозке и открывании продукта, она индифферентна к его форме и размеру, способствует сохранению без потери его потребительских свойств, товарного вида и свежести в течение гарантируемого времени хранения и потребления с соблюдением нормативов по температуре и влажности. Стерилизация продукта перед помещением его в пленку или упаковка в пленку под вакуумом позволяют производителю мяса птицы избежать замораживания его с целью предупредить размножение бактерий. Данный способ сохраняет максимально полный набор вкусовых качеств продукта, его гигиенических, санитарных и экологических свойств. В то же время технология хранения продукта при пониженной температуре, несмотря на то что она не имеет альтернатив даже в отдаленной перспективе и, кроме того, использует современные механические и химические средства упаковки, все еще дополнительно нуждается в серьезной физико-математической разработке и обосновании протекающего в системе мясо + пленка теплового процесса. В данном исследовании следующая из закона сохранения энергии система уравнений теплопроводности для моделирующих систему двух тел — мяса птицы и упаковочной пленки — полагается в основу расчета процесса теплообмена между этими субстанциями и охлаждающей внешней средой. Также выявляется влияние теплоизолирующего свойства пленки на распределение температуры в продукте.

Ключевые слова: мясо птицы, охлаждение, полиэтиленовая пленка.

Abstract:

One of the most common methods of storing poultry meat at present is packaging in plastic wrap. Packaging made of film is easy and convenient when transporting and opening the product, it is indifferent to its shape and size, contributes to the preservation, without loss of its consumer properties and presentation, freshness during the guaranteed storage and consumption time in compliance with temperature and humidity standards. Sterilization of the product before placing it in a film or packaging in a film under vacuum allows the poultry meat producer to avoid freezing it in order to prevent the reproduction of bacteria. This method preserves the most complete set of taste qualities of the product, its hygienic, sanitary and environmental properties. At the same time, the technology of storing the product at a reduced temperature, despite the fact that it has no alternatives even in the long term and, in addition, uses modern mechanical and chemical packaging means, still additionally needs serious physical and mathematical development and justification of the thermal process occurring in the meat + film system. In this study, the system of heat conduction equations following the law of conservation of energy for modeling the system of two bodies — poultry meat and packaging film — is the basis for calculating the heat exchange process between these substances and the cooling external environment, the influence of the heat-insulating property of the film on the temperature distribution in the product is revealed.

Keywords: poultry meat, cooling, polyethylene film.

Продовольственная безопасность, замещение импорта и прирост объема отечественной продовольственной продукции, в том числе животного происхождения в Российской Федерации не могут быть в полной мере осуществлены, если не будет реализована надежная система хранения и транспортирования продукции при движении ее от производителя к потребителю. В настоящее время холодильные технологии хранения пищевых продуктов животного происхождения являются преобладающими, поскольку с их помощью удается в наилучшей степени сохранить нативные свойства продуктов, обеспечить их длительное хранение и доставку. С целью решить эти проблемы научно-техническим сообществом в России и за рубежом проводятся теоретические и экспериментальные исследования процессов охлаждения упакованных и неупакованных пищевых продуктов с использованием охлаждающих сред; влияния теплопритоков в холодильных камерах на изменение температуры охлаждающих сред и мяса при близкриоскопических температурах; установления зависимости от свойств упаковочных материалов стабилизации температуры продукта при хранении в холодильной камере и др.

Ключевым моментом технологии хранения мяса в вакуумной упаковке, как базового положения этой методологии, является полная эвакуация воздуха из упаковки, поскольку именно в отсутствие воздуха процессы окисления значительно замедляются, микробиота развивается медленнее, продукт не подвергается порче, мясо сохраняет изначальный уровень влажности, а также запах и все вкусовые свойства. Отсюда следует вывод, что при такой технологии эффективность хранения продуктов, в том числе мяса птицы, резко возрастает.

В настоящее время хранение мясного продукта в вакуумной упаковке считается наилучшей технологией. Учитывая важность вопроса использования такого широко распространенного упаковочного средства, как пленочный материал, очевидна востребованность алгоритмического аппарата для расчета влияния на систему продукт + пленка подводимого к ней с той или иной технологической целью теплового потока. Этому вопросу посвящен ряд публикаций в научной периодической печати.

Так, отмечается, что потребление мясной продукции в переработанном виде постоянно увеличивается, обогнав по совокупности в общей структуре ее производства и потребления все виды переработанной продукции¹. Подчеркивается большая роль научных исследований в развитии упаковочных средств для промышленности: в публикациях ученых разных стран в этой области представлены современные научные достижения в вопросе применения вакуумной упаковки для охлажденного мяса и полуфабрикатов, включая и разновидности упаковки. Отмечается, что наибольшее внимание уделено вопросам обоснования показателей безопасности и качества мясной продукции, а также функциональности упаковочных материалов.

В обзорном порядке авторы другой статьи² освещают наиболее востребованные виды упаковки, создаваемой из многослойных полимерных материалов на различных типах оборудования, таких как термоформеры, трейсилеры и флоу-пак. Рассматриваются принципы работы различных типов машин и особенности их применения, а также наиболее важные для производителя аспекты при выборе оборудования для упаковки мясной продукции. Отмечается преимущество по сравнению с другими упаковочными системами термоформеров как обладающих наибольшей универсальностью, поскольку данная машина допу-

¹ Семенова А.А., Насонова В.В., Ревуцкая Н.М., Трифонов М.В. Достижения и перспективы развития полимерной упаковки мяса и полуфабрикатов // Техника и технология пищевых производств. 2018. Т. 48. № 3. С. 161—174.

² Ревуцкая Н.М., Насонова В.В. Тенденции в сфере упаковки мяса и мясной продукции // Все о мясе. 2020. № 3. С. 32—35.

скает выполнение производственных операций по упаковке в условиях МГА, под вакуумом, а также skin- и shrink-технологии.

В статье³ уделяется внимание такому распространенному в технологии и экономике мясного производства явлению, как влагообразование, применительно к развитию этого процесса в упакованном охлажденном мясе. В работе рассмотрены основные причины отделения влаги в упаковке мяса и отмечено, что избыточное содержание влаги в упаковке отрицательно влияет на экономическую составляющую производства и потребительские свойства продукта. Установлено, что интенсивность потерь массы мясного сырья обусловлена физиологическими и технологическими причинами — генетикой и стрессовым состоянием животного, технологией обработки и способом упаковывания мяса.

В публикации⁴ рассматривается проблема разработки приготовленных для упаковочных материалов композитов на биологической основе, состоящих из полимолочной кислоты (PLA), волокон кенафа и тимола. В работе исследованы их антимикробные (AM) свойства и стабильность при различных условиях хранения. Констатируется, что в упаковке из композиционной пленки, содержащей 20—30 % мас./мас. тимола, кишечная палочка в триптоновом соевом бульоне восстанавливалась через два дня при 37 °С, при этом создавалась значительная зона ингибирования в бульоне при контакте с инокулированными пластинами *E. coli*. Композитные пленки также уменьшали инокулированную на поверхности обработанных нарезанных образцов курицы *E. coli* через 30 дней при 10 °С, как при прямом контакте, так и в паровой фазе. Таким образом, композитные пленки PLA/kenaf/thymol продемонстрировали значительный потенциал для развития активных упаковочных систем с целью продления срока годности некоторых обработанных пищевых продуктов.

В целом в этих публикациях затронуты имеющие важное практическое значение для мясоперерабатывающей отрасли промышленности вопросы, такие как влияние состава пленок на показатели безопасности и качества мясной продукции, информация о технологических особенностях предлагаемого для мясного производства оборудования, влияние на развитие микробов разработанных на биологической основе упаковочных материалов композитов. Однако нужно отметить и недостаток работ по вопросу научно обоснованного и удобного для практического использования в расчетах теплового влияния упаковочных

³ Ревуцкая Н.М., Насонова В.В., Андропова М.С. К вопросу отделения влаги в упаковке мяса и мясных полуфабрикатов // Все о мясе. 2022. № 2. С. 3—5.

⁴ Tawakkal I.S.M.A., Bigger S.W., Cran M.J. Effect of poly(lactic acid)/kenaf composites incorporated with thymol on the antimicrobial activity of processed meat // Journal of Food Processing and Preservation. 2017. Т. 41. № 5.

пленок на распределение температуры в охлаждаемом непрерывно переработанном мясном сырье.

В настоящей работе на базе модели реальных заготовок мясного сырья — упакованного плотным образом (в условиях вакуума) продукта, приближенно симулируемого геометрическим телом канонической формы, — проводится количественный анализ поля температуры в этой субстанции с целью использовать полученные результаты для управления режимными параметрами процесса обработки мяса птицы холодом.

Охлаждение расфасованных тушек цыплят и кур. Фасованный продукт мяса птицы по своей форме геометрически близок симметричному относительно продольной оси двухслойному (продукт + пленка) прямоугольному параллелепипеду. Причем поскольку продольный размер такого фасованного композита (например, мяса цыплят и кур) значительно превышает поперечный, то с точки зрения физико-математического моделирования данный продукт с определенным допущением может трактоваться в меридиональном сечении как двухслойная пластина (Рисунок 1).

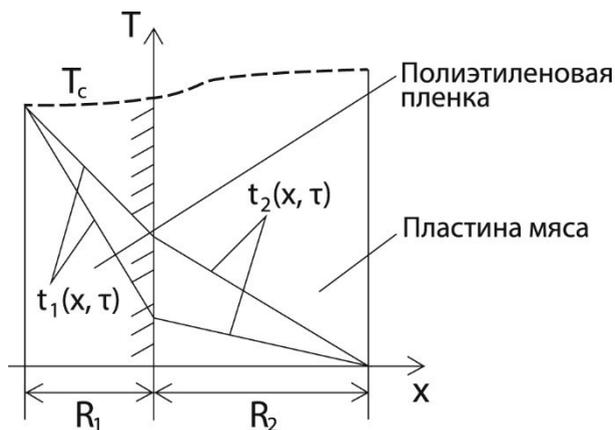


Рис. 1. Схема к расчету температурного поля системы двух тел.

Пусть два тела — пластина мяса птицы и облегающая эту пластину сравнительно тонкая эквидистантная пластина из полиэтилена (пленка) — имеют разные теплотехнические коэффициенты, причем в начальный момент времени пластина и пленка имеют одинаковую температуру T_0 .

В дальнейшем к поверхности пленки подводится теплота (холод) температурой $T_c = \text{const}$ ($T_c < T_0$). Требуется найти распределение

температуры по толщине и времени моделирующих пленку и пластину мяса субстанций как системы из двух тел.

Имеем дифференциальное уравнение теплопроводности (Фурье) для тела 1 (пленка):

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2} \quad (\tau > 0, x > 0) \quad (1)$$

и аналогичное уравнение для тела 2 (мясо):

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} \quad (\tau > 0, x > 0), \quad (2)$$

где, по соответствующим индексам 1 и 2, $t(x, \tau)$ — температура тела, τ — время, x — координата, $a = \lambda / (c\rho)$ — коэффициент температуропроводности; λ , c , соответственно, коэффициент теплопроводности и теплоемкости, ρ — плотность тела.

Начальные условия:

$$t_1(x, 0) = T_0, (-R_1 \leq x \leq 0); t_2(x, 0) = T_0 (0 \leq x \leq R_2); T_0 = \text{const} \quad (3)$$

Граничные условия:

$$t_1(-R_1, \tau) = T_c, t_2(R_2, \tau) = T_c, \quad (4)$$

$$t_1(0, \tau) = t_2(0, \tau), \quad (5)$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t_2(0, \tau)}{\partial x}. \quad (6)$$

Соотношения (3) — условие равенства исходной температуры пленки и пластины мяса в начальный момент времени; (4) — температура на внешней границе пленки и пластины мяса; (5) — условие равенства температуры на их общей границе; (6) — там же, выражение потока тепла (Рис. 1).

Как видно, в рамках терминологии теории теплопроводности⁵ имеют краевую задачу первого рода.

Решение задачи. Опуская для простоты индекс 2, для пластины мяса адаптированное на проблему охлаждения решение краевой задачи (1)—(6) имеет вид

$$t(x, \tau) = T_c + \theta(x, \tau) \cdot \Delta T, \quad (8)$$

⁵ Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: «Высшая школа», 1967. 600 с.

$$\text{где } \theta(x, \tau) = \frac{x-R_2}{R_2+R_1K\varepsilon^{-1}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2K\varepsilon \cdot \sin(Ka^{1/2} \cdot \mu_n \cdot (R_2-x)/R_2)}{\mu_n \cdot \phi(n)} \cdot \exp(-b(n)^2 \cdot \tau), \quad (9)$$

$$\phi(n) = (K\varepsilon + Ka^{1/2}KR_1) \cdot \sin(\mu_n) \cdot \sin(b(n)) - (1 + K\varepsilon \cdot Ka^{1/2} \cdot KR_1) \cdot \cos(\mu_n) \cdot \cos(b(n)), \quad (10)$$

$$b(n) = Ka^{1/2} \cdot KR_1 \cdot \mu_n, \quad (11)$$

$$Ka = \frac{a_1}{a_2}, K_{R1} = \frac{R_1}{R_2}, K\varepsilon = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}}, \quad (12)$$

μ_n — корни характеристического уравнения

$$Ctg(Ka^{1/2} \cdot KR_1 \cdot \mu) + K\varepsilon \cdot Ctg(\mu) = 0 [5], \quad (13)$$

$$\Delta T = T_0 - T_c > 0.$$

Численный эксперимент. Геометрические и физико-механические параметры процесса охлаждения пленки и мяса приведены в Таблице 1.

Табл. 1. Физико-механические параметры полиэтиленовой пленки и мяса.

	Субстанция	R, м	ρ, кг/м³	λ, Вт/(м·К)	c, Дж/(кг·К)	a, м²/с
1	Полиэтиленовая пленка	10 ⁻³	920	0,34	2100	1,76*10 ⁻⁷
2	Мясо птицы	5·10 ⁻²	1070	0,49	3800	1,24*10 ⁻⁷

Рассчитанные на базе данных этой таблицы и значений физико-механических параметров (12) собственные значения краевой задачи (1)—(7) с удовлетворительной точностью определяются как последовательные по величине корни уравнения (13), согласно формуле

$$\mu_n = n\pi, n = 1, 2 \dots \quad (14)$$

Причем, для того чтобы обеспечить достаточную точность, в сумме (9) при расчетах сохраняли 30 слагаемых.

В рамках принятой физико-математической модели задачи зависимости⁶ согласно (9) по времени τ приведенной (избыточной) температуры θ образца мяса при $T_0 = 20$ °С, $T_c = -20$ °С и разной глубине x образца показаны на Рисунке 2.

⁶ Семенов Е.В., Славянский А.А., Карамзин В.А. Количественное моделирование процесса разделения суспензий в роторе фильтрующей центрифуги периодического действия // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. № 11. С. 7—10.

Визуальный анализ кривых на Рисунке 2 обнаруживает существенное теплоизолирующее влияние пленки на мясо на его поверхности (кривая 1 ниже кривой 4) за весь период обработки. С продвижением вглубь пластины это влияние в более слабой степени начинает проявляться начиная с 8-й минуты (кривая 2 располагается ниже кривой 5). Наконец, посередине пластины теплоизолирующее влияние пленки на мясо в слабой степени сказывается лишь после 12-й минуты наблюдений (кривые 3 и 6 практически не различаются).

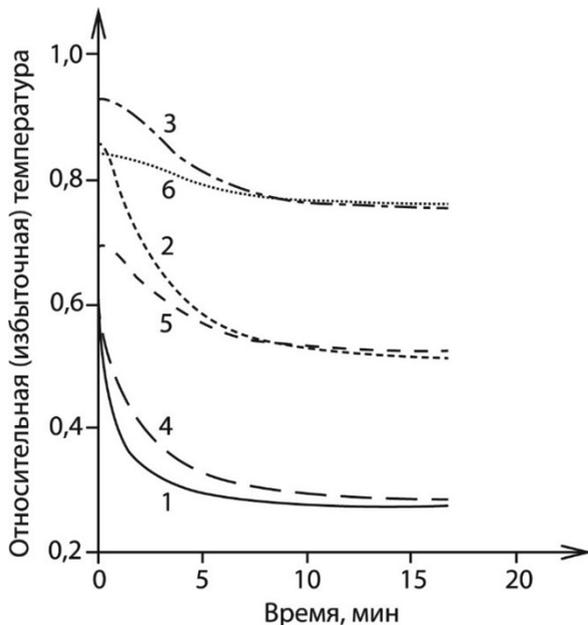


Рис. 2. Зависимости по времени t относительной (избыточной) температуры θ пластины мяса на глубине x образца для различных значений коэффициента теплопроводности λ пластины ($T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = -20\text{ }^\circ\text{C}$; $\lambda = 0,49\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$): 1 — $x = 0,013$; 2 — $x = 0,025$; 3 — $x = 0,038$, м; $\lambda = 1\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$: 4 — $x = 0,013$; 5 — $x = 0,025$; 6 — $x = 0,038$, м).

Как видно по (8) и расчетной зависимости (9) при зафиксированных значениях координаты x (в том числе и при $x = 0,025$) температура t мяса зависит только от времени t и параметрически — от температуры T_c внешней среды, а также от разности температур $\Delta T = T_0 - T_c$, что естественным образом отражается на взаимном положении кривых на Рис. 2. Например, на основе расчета в соответствии с поведением кри-

вой 2 можно прийти к заключению, что под действием подводимого извне к мясу потока тепла с температурой $T_c = -20\text{ }^\circ\text{C}$ (при исходной температуре образца $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$) тепловое состояние в середине пластины мяса в течение 20 минут понизилось до $t = 4,9\text{ }^\circ\text{C}$.

В свою очередь, осредненное по толщине пластины, рассчитываемое по зависимости

$$\theta(\tau) = \frac{1}{R_2} \int_0^{R_2} t(x, \tau) dx$$

(где $t(x, \tau)$ определяется согласно (8), (9)) при коэффициенте теплопроводности $\lambda = 0,49\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ значение температуры образца мяса приведено на Рисунке 3.

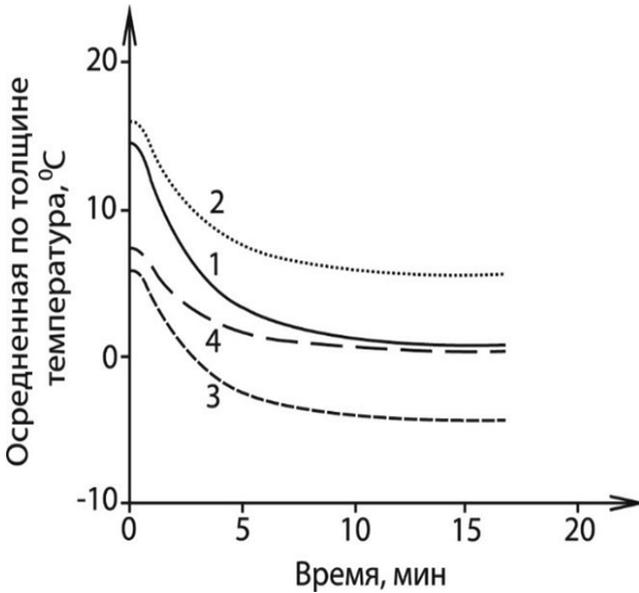


Рис. 3. Зависимости осредненной по толщине температуры θ обернутой полиэтиленовой пленкой пластины мяса птицы от времени τ проведения процесса охлаждения ($T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$: 1 — $T_c = -20$, 2 — $T_c = -10\text{ }^\circ\text{C}$; $T_0 = 10\text{ }^\circ\text{C}$: 3 — $T_c = -20$, 4 — $T_c = -10\text{ }^\circ\text{C}$).

Причем, как следует, например, из вида кривой 1 рис. 3, по состоянию образца, осредненная по его толщине температура изменяется от близкого остывшему ($t = 12\text{ }^\circ\text{C}$) до охлажденного ($t = 4\text{ }^\circ\text{C}$) состояния. При этом о поведении температурного поля, в целом, по толщине пла-

стины, приближенно, можно судить исходя из значения температуры в центре пластины.

Охлаждение расфасованных тушек гусей и индеек. Фасованный продукт птицы большего, по сравнению с куриным, размера (гуси и индейки) по своей форме ближе к двухслойному шару. Поэтому, как и в предыдущем случае охлаждения системы из двух тел пластинчатой формы, здесь моделируются два объекта исследования (мясо птицы в виде тела шарообразной формы и облегающий это тело тонкий слой полиэтилена (пленка) с разными теплотехническими коэффициентами⁷.

В дальнейшем к поверхности пленки подводится теплота (холод) температурой $T_c = \text{const}$ ($T_c < T_0$). Требуется найти распределение температуры по толщине и времени моделирующих образец мяса и пленки как системы из двух тел сферической формы.

Имеем отнесенное к сферическим координатам дифференциальное уравнение теплопроводности для тела 1 — блока мяса (Рисунок 4):

$$\frac{\partial [rt_1(t,\tau)]}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 [rt_1(t,\tau)]}{\partial r^2} \quad (\tau > 0, (0 < r < R_1)) \quad (11)$$

и аналогичное уравнение для тела 2 (пленка из полиэтилена):

$$\frac{\partial [rt_2(t,\tau)]}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 [rt_2(t,\tau)]}{\partial r^2} \quad (\tau > 0, (R_1 < r < R_2)), \quad (12)$$

где, по соответствующим индексам 1 и 2, $t(r,\tau)$ — температура тела, τ — время, r — координата, $a = \lambda/(c\rho)$ — коэффициент температуропроводности; λ , c , соответственно, коэффициент теплопроводности и теплоемкости, ρ — плотность тела.

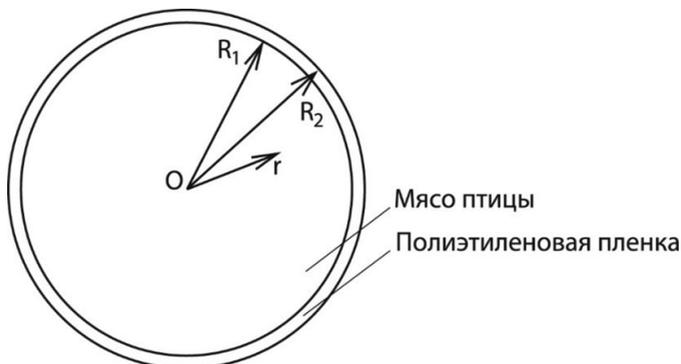


Рис. 4. Схема к расчету процесса охлаждения изолированно-го полиэтиленовой пленкой мяса птицы крупного размера.

⁷ Васюкова А.Т., Славянский А.А., Егорова С.В., Мошкин А.В., Абесадзе Л.Т. // Масложировая промышленность. 2016. № 6. С. 12—15.

Начальные условия:

$$t_1(r,0) = T_0, \quad 0 \leq r \leq R_1; \quad t_2(r,0) = T_0, \quad R_1 \leq r \leq R_2. \quad (13)$$

Граничные условия:

$$t_1(R_1, \tau) = t_2(R_1, \tau), \quad (14)$$

$$K\lambda \frac{\partial t_1(R_1, \tau)}{\partial r} = \frac{\partial t_2(R_1, \tau)}{\partial r}, \quad (15)$$

$$t_2(R_2, \tau) = T_c \quad (16)$$

где обозначено

$$K\lambda = \lambda_1/\lambda_2, \quad (17)$$

Физико-механический смысл соотношений (13)—(16) такой же, как и для (3)—(6).

Решение задачи. Если для простоты опустить индекс 1, то решение краевой задачи (11)—(16) собственно для пластины мяса принимает вид:

$$t(r, \tau) = T_c + \theta(r, \tau) \cdot \Delta T, \quad (18)$$

где

$$\theta(r, \tau) = \frac{t(r, \tau) - T_c}{\Delta T} = 2 \frac{R_2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\phi_n} \text{Sin}(\mu_n \frac{r}{R_1}) \cdot \text{Sin}[\mu_n \cdot Ka^{1/2}(K_R - 1)] \exp[-\mu_n^2 Fo_1(\tau)], \quad (19)$$

$$\Delta T = T_0 - T_c$$

$$\phi_n = K\varepsilon \cdot \mu_n \text{Sin}^2[\mu_n \cdot Ka^{1/2}(K_R - 1)] + \mu_n \cdot Ka^{1/2}(K_R - 1) \text{Sin}^2(\mu_n) + \frac{1 - Ka^{1/2} \cdot K\varepsilon}{Ka^{1/2} \cdot \mu_n} \text{Sin}^2(\mu_n) \cdot \text{Sin}^2[\mu_n \cdot Ka^{1/2}(K_R - 1)], \quad (20)$$

$$Ka = \frac{a_1}{a_2}, \quad K_R = \frac{R_2}{R_1}, \quad K\varepsilon = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}}, \quad Fo_1(\tau) = \frac{a_1 \tau}{R_1^2}. \quad (21)$$

Входящие в (19), (20) коэффициенты μ_n являются корнями характеристического уравнения [5]

$$\mu \cdot Ka^{1/2} \cdot \text{Ctg}[\mu \cdot Ka^{1/2} \cdot (K_R - 1)] + K\lambda \cdot (\mu \text{Ctg} \mu - 1) = 0. \quad (22)$$

Численный эксперимент. Геометрические и физико-механические параметры процесса охлаждения пробного образца мяса птицы крупного размера приведены в Таблице 2.

Табл. 2. Физико-механические параметры образца мяса птицы крупного размера, облекаемого полиэтиленовой пленкой.

	Субстанция	R, см	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c, Дж/(кг·К)	a, м ² /с
1	Мясо птицы $0 < r \leq R_1$	10	1070	0,49	3800	$1,24 \cdot 10^{-7}$

2	Полиэтиленовая пленка $R_1 \leq r \leq R_2$	10,1	920	0,34	2100	$1,76 \cdot 10^{-7}$
---	--	------	-----	------	------	----------------------

Рассчитанные на базе данных Таблицы 2 и значений физико-механических параметров (21) собственные значения краевой задачи (11)—(16) как корни уравнения (22) отнесены к Таблице 3.

Табл. 3. Корни характеристического уравнения (22).

Номер корня	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
μ_n	1,16	3,14	4,85	6,28	8,0	9,42	11,20	12,56	14,4	15,7

При этом в сумме (19) сохраняли 10 слагаемых.

Результаты расчета на базе зависимостей (17)—(22) в графическом виде представлены кривыми на Рисунке 5.

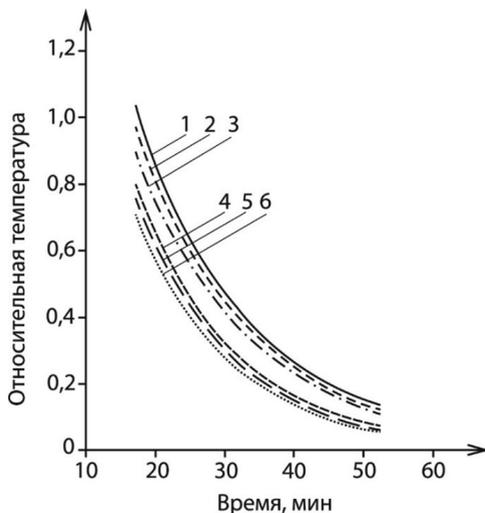


Рис. 5. Зависимости по времени τ относительной температуры θ образца мяса птицы крупного размера на глубине r образца для различных значений коэффициента теплопроводности λ образца ($T_c = -5$ °С; $\lambda = 0,49$ Вт/(м·К): 1 — $r = 0,025$; 2 — $r = 0,050$; 3 — $r = 0,075$, м; $\lambda = 0,6$ Вт/(м·К): 4—6, то же).

Согласно численному анализу, одна из особенностей поля температуры блока мяса заключается в том, что из-за сравнительно большого

размера блока ($R_1 = 10$ см) избыточная температура θ по глубине блока в процессе охлаждения изменяется незначительно (например, кривые 1—3 расположены вблизи друг друга) — тепло постепенно распространяется по блоку мяса. Причем сам процесс развивается в замедленном темпе и занимает более суток. Другой особенностью обрабатываемой холодом субстанции является сильная зависимость по времени скорости его распространения от способности мяса проводить тепло (совокупность кривых 1—3 заметно сдвинута вправо относительно кривых 4—6). При этом, естественно, с усилением этой способности (увеличением коэффициента теплопроводности λ_1) ускоряется и процесс теплопередачи в блоке⁸.

В свою очередь, как видно по поведению, например, кривых 3 и 6 на Рис. 5, тепловое состояние охлаждаемого мяса переходит, в соответствии с принятой терминологией, из остывшего в подмороженное (субкриоскопическое).

Очевидно, что выявленные аналитически и численным путем особенности процесса охлаждения упакованного продукта в целом по мясу птицы согласуются с физическим смыслом исследуемого процесса.

Резюмируя данные проведенного количественного анализа процесса тепловой обработки композита из облекаемого полиэтиленовой пленкой образца мяса птицы с физико-математической точки зрения, можно заключить, что поле температуры субстрата мяса является наиболее общим информативным фактором теплового потенциала образца. Так, на базе этого фактора могут быть количественно определены градиенты стратификации температуры в мясном продукте по времени и координате, расход подводимой к телу теплоты и другие показатели, что может быть эффективно использовано при разработке расчетного инструментария по управлению режимными параметрами процесса обработки холодом исследуемого композита.

Список литературы

1. Васюкова А.Т., Славянский А.А., Егорова С.В., Мошкин А.В., Абесадзе Л.Т. Сравнительный анализ пищевой ценности растительных масел для использования в хлебопечении // Масложировая промышленность. 2016. № 6. С. 12—15.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: «Высшая школа», 1967. 600 с.

⁸ Славянский А.А., Семенов Е.В., Грибкова В.А., Николаева Н.В. О кинетике потока жидкости в центробежном сепараторе // Хранение и переработка сельхозсырья. 2020. № 4. С. 166—176.

3. Семенов Е.В., Славянский А.А., Карамзин В.А. Количественное моделирование процесса разделения суспензий в роторе фильтрующей центрифуги периодического действия // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. № 11. С. 7—10.

4. Семенова А.А., Насонова В.В., Ревуцкая Н.М., Трифонов М.В. Достижения и перспективы развития полимерной упаковки мяса и полуфабрикатов // Техника и технология пищевых производств. 2018. Т. 48. № 3. С. 161—174.

5. Славянский А.А., Семенов Е.В., Грибкова В.А., Николаева Н.В. О кинетике потока жидкости в центробежном сепараторе // Хранение и переработка сельхозсырья. 2020. № 4. С. 166—176.

6. Ревуцкая Н.М., Насонова В.В. Тенденции в сфере упаковки мяса и мясной продукции // Все о мясе. 2020. № 3. С. 32—35.

7. Ревуцкая Н.М., Насонова В.В., Андропова М.С. К вопросу отделения влаги в упаковке мяса и мясных полуфабрикатов // Все о мясе. 2022. № 2. С. 3—5.

8. Tawakkal I.S.M.A., Bigger S.W., Cran M.J. Effect of poly(lactic acid)/kenaf composites incorporated with thymol on the antimicrobial activity of processed meat // Journal of Food Processing and Preservation. 2017. Т. 41. № 5.

Сведения об авторах

Грибкова Вера Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского. Тел.: 8495-670-15-10.

Семенов Евгений Владимирович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского. Тел.: 8495-670-15-10, 8495-396-91-12, 8926-543-28-87; e-mail: *sem-post@mail.ru*

Славянский Анатолий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского. Тел.: 8495-670-15-10.

Николаева Наталья Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского. Тел.: 8495-670-15-10.

Information about the authors

Gribkova Vera Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management. Phone: 8495-670-15-10.

Пищевые системы и биотехнологии

Semenov Evgeny Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management. Phone: 8495-670-15-10, 8495-396-91-12, 8926-543-28-87; e-mail: *sem-post@mail.ru*

Slavyanskiy Anatoliy Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Innovative Technologies of Products from Vegetable Raw Materials, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management. Phone: 8495-670-15-10.

Nikolaeva Natalia Valeryevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management. Phone: 8495-670-15-10.