




## Математическое моделирование процесса сушки снеков из фарша бычка азовского в псевдооживленном слое

Вячеслав С. Косачев <sup>1</sup>	<a href="mailto:vs.kosachev@gmail.com">vs.kosachev@gmail.com</a>	 0000-0002-2582-8547
Александр Н. Остриков <sup>2</sup>	<a href="mailto:ostrikov27@yandex.ru">ostrikov27@yandex.ru</a>	 0000-0002-2335-0017
Александр А. Яшонков <sup>3</sup>	<a href="mailto:jashonkov@rambler.ru">jashonkov@rambler.ru</a>	 0000-0002-1431-679X

<sup>1</sup> Кубанский государственный технологический университет, ул. Красная, 135, г. Краснодар, 350072, Россия




<sup>2</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

<sup>3</sup> Керченский государственный морской технологический университет, ул. Орджоникидзе, д. 82, г. Керчь, 298309, Республика Крым, Россия

**Аннотация.** Предложена математическая модель процесса сушки снеков из фарша бычка азовского в псевдооживленном слое с распределенными параметрами процесса теплообмена между поверхностью анизотропного тела и окружающей средой. Рассмотрено решение задачи нестационарной теплопередачи путем теплопроводности с использованием метода Галёркина. Пробные и проверочные функции используемого метода, реализованные в среде инженерных расчетов PTC MathCAD линейно независимы, представляют собой первые элементы полной системы полиномиальных функций и удовлетворяют граничным и начальным условиям. Проведены теоретические и экспериментальные исследования, которые позволяют рассмотреть процесс сушки снеков из фарша бычка азовского в псевдооживленном слое и научно обосновать варианты его совершенствования. По результатам экспериментальных исследований показана адекватность полученной математической модели. Доказано, что при равномерном начальном распределении температуры в процессе предварительного прогрева температурная неоднородность возрастает вплоть до момента фазового перехода на поверхности высушиваемого объекта. Установлена важность учета фазы предварительного прогрева влажного материала, так как на этой стадии формируется температурный профиль, отличающийся значительной неоднородностью. Это особо важно, так как температурная неоднородность непосредственно влияет на качество пищевого продукта. Подтверждена возможность учета анизотропии в процессах теплообмена при использовании объемной математической модели переноса с распределенными параметрами. Разработанная методика позволяет значительно увеличить точность решения анизотропной краевой задачи, путем замены операции интегрирования элементов матриц жесткости системой дифференциальных уравнений алгебраическими формулами.

**Ключевые слова:** сушка, снеки, рыбный фарш, математическое моделирование, метод Галёркина, псевдооживленный слой

## Mathematical modeling of snacks drying process from minced fish in a fluidized bed

Vyacheslav S. Kosachev <sup>1</sup>	<a href="mailto:vs.kosachev@gmail.com">vs.kosachev@gmail.com</a>	 0000-0002-2582-8547
Alexander N. Ostrikov <sup>2</sup>	<a href="mailto:ostrikov27@yandex.ru">ostrikov27@yandex.ru</a>	 0000-0002-2335-0017
Alexandr A. Yashonkov <sup>3</sup>	<a href="mailto:jashonkov@rambler.ru">jashonkov@rambler.ru</a>	 0000-0002-1431-679X

<sup>1</sup> Kuban State Technological University, 350072, Krasnodar Krai, Krasnodar, Moskovskaya str., 2.

<sup>2</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

<sup>3</sup> Kerch State Maritime Technological University, Ordzhonikidze str. 82, Kerch, 298309, Republic of Crimea, Russia

**Abstract.** A mathematical model of snacks drying process from minced fish in a fluidized bed with distributed parameters of the heat exchange process between the surface of an anisotropic body and the environment is proposed. The solution of the problem of non-stationary heat transfer by heat conduction using the Galerkin method is considered. The trial and verification functions of the method used, implemented in the PTC MathCAD engineering calculation environment, are linearly independent, represent the first elements of a complete system of polynomial functions and satisfy the boundary and initial conditions. Theoretical and experimental studies have been carried out, which allow considering the process of drying snacks from minced fish in a fluidized bed and scientifically substantiate options for its improvement. According to the results of experimental studies, the adequacy of the obtained mathematical model is shown. It is proved that with a uniform initial temperature distribution during preheating, the temperature inhomogeneity increases up to the moment of a phase transition on the surface of dried object. The importance of taking into account the preheating phase of wet material is established, since at this stage a temperature profile is formed, which is characterized by significant heterogeneity. This is especially important, since temperature heterogeneity directly affects the quality of the food product. The possibility of taking into account anisotropy in heat transfer processes using a three-dimensional mathematical model of transport with distributed parameters is confirmed. The developed technique allows significantly increasing the accuracy of an anisotropic boundary value problem solving by replacing the operation of integrating the stiffness matrix elements with a system of differential equations by algebraic formulas.

**Keywords:** drying, snacks, minced fish, mathematical modeling, Galerkin method, fluidized bed

### Для цитирования

Косачев В.С., Остриков А.Н., Яшонков А.А. Математическое моделирование процесса сушки снеков из фарша бычка азовского в псевдооживленном слое // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 2. С. 17–26. doi:10.20914/2310-1202-2022-2-17-26

### For citation

Kosachev V.S., Ostrikov A.N., Yashonkov A.A. Mathematical modeling of snacks drying process from minced fish in a fluidized bed. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 2. pp. 17–26. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-2-17-2629

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Введение

Для математического описания процесса сушки используют дифференциальные уравнения, которые с учетом принимаемых допущений не могут описать процесс с требуемой адекватностью [20]. Поэтому приходится прибегать к использованию моделей, описываемых дифференциальными уравнениями с разрывной правой частью [21].

Изучая влияние температуры на сушку кинетики средиземноморских мидий (*mytilus galloprovincialis*) в солнечной сушилке, работающей при принудительной конвекции, при трех температурах воздуха (50, 60 и 70 °C), была получена логарифмическая модель [19]:

$$MR = a \exp(-kt) + c, \quad (1)$$

где эмпирические коэффициенты рассчитывались по формулам:

$$a = 2.8293 - 0.06824 \cdot T + 6.54 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 \quad (2)$$

$$k = 0.047 - 0.00155 \cdot T + 1.5 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \quad (3)$$

$$c = 2.6283 + 0.07502 \cdot T - 5.475 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 \quad (4)$$

Модель (1) показала высокую сходимость экспериментальных данных с коэффициентом корреляции ( $r$ ) и самым низким значением пониженного хи-квадрата ( $\chi^2$ ), эффективное значение коэффициента диффузии  $D_{\text{эф}}$  изменялось от  $1.14 \cdot 10^{-9}$  до  $3.61 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с.

В работе [22] рассмотрен процесс сушки вторичных продуктов разделки рыб, в которой используется метод, базирующийся на основе уравнений тепло- и влагопереноса А.В. Лыкова. Используя разработанную компьютерную программу на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7, был смоделирован процесс сушки продуктов из рыбы путем решения задачи тепло- и влагопереноса на кубической сетке с учетом комбинированной технологии нагрева (конвективный и СВЧ-нагрев). Задаваясь теплофизическими и геометрическими параметрами структуры частей рыбы и СВЧ-источника, получены графики и картограммы пространственного распределения влажности и температуры.

Морепродукты, подвергаемые тепловой обработке (сушки, обжарки и варки) имеют высокую влажность [1]. При этом внутренняя и внешняя тепло- и массопередача описывается уравнениями с граничными условиями третьего рода. Математическое моделирование, в этом случае, связано с переходом к многомерной модели с распределенными параметрами [2]. При этом теплофизические коэффициенты изменяются скачкообразно на движущемся фронте поверхности испарения. Решение сопряженных краевых задач тепло- и массопередачи с движущейся границей особенно важно для моделирования таких интенсивных процессов [3], как обжарка,

сушка, в которых внутренний процесс контролируется сопротивлениями перемещения массы и теплоты, а внешние сопротивления играют существенную роль при обмене массы и теплоты с окружающей паровоздушной средой. Успешное моделирование этого процесса позволяет предсказать не только скорость обезвоживания продукта, но и распределение температурного поля в материалах пищи, что особенно важно, так как непосредственно влияет на ее качество [4]. Температурное распределение является весьма существенным во многих процессах сушки, например, таких как, сушка замораживанием [5–7], паром [8] и воздухом [9]. При сушке воздухом температурным распределением в материале, обычно пренебрегают, так как критерий Био мал из-за низкого коэффициента теплопередачи в воздушной среде. При этом представленные в литературе для воздушной сушки температурные распределения в пределах материала предсказывают изменение в его влагосодержании эмпирическим способом [10–12]. Однако, как было показано для модели сушки распылением единичной капли [13], температурное распределение внутри материала не может игнорироваться даже в этом идеальном случае. Решение краевой задачи с подвижной границей фазового перехода, определяемого температурой кипения воды при жарке или сушке перегретым паром, температурой сублимации при сушке замораживанием и температурой мокрого термометра в процессе воздушной сушки или сушки распылением позволяет обобщить эти процессы.

**Цель работы** – провести математическое моделирование анизотропного процесса получения сушеных рыбных продуктов для усовершенствования способа сушки в сушилках псевдоожиженного слоя с учетом восстановления динамики температурных полей и полей влагосодержания на основе решения обратной задачи теплопроводности.

## Материалы и методы

Объектом исследований является процесс сушки рыбного сырья на примере производства сушеных снеков из фарша бычка азовского (*Neogobius melanostomus*), представляющего собой сложный тепло массообменный процесс. Скорость его во многих случаях определяется скоростью внутри теплопереноса, определяющего условия испарения влаги в твердом теле. В случае высокоинтенсивных тепловых потоков, характерных для сушки рыбных продуктов в так называемом псевдоожиженном слое материала, когда под действием восходящего потока воздуха (сушильного агента) частицы слоя переходят во взвешенное состояние. Процесс в псевдоожиженном слое позволяет значительно увеличить поверхность контакта между частицами материала

и сушильным агентом, интенсифицировать испарение влаги из материала и сократить продолжительность сушки. Применение в сушилках псевдооживленном слое, позволяет улучшить перемешивание материала и тем самым в несколько раз повысить величину коэффициентов тепло- и массообмена. Решение классической задачи теплопроводности возможно с использованием критериев подобия, однако для анизотропных процессов их применение затруднительно. Для оценки параметров процессов тепло- и массообмена предлагается использование метода математического моделирования, позволяющего идентифицировать коэффициенты тепло- и массообмена, на основе решения обратной задачи нестационарного теплообмена при температурах выше 100°C между поверхностью анизотропного тела и окружающей средой по закону Ньютона. Все процессы, связанные с переносом вещества, энергии и гидродинамические процессы описываются уравнениями Фика, Фурье и Ньютона [14]:

$$\begin{aligned} q_D &= -D \frac{dc}{dx}, \\ q_\lambda &= -\lambda \frac{dT}{dx}, \\ q_\eta &= -\eta \frac{dV}{dx}, \end{aligned}$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;  $c$  – концентрация;  $x$  – координата;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\eta$  – коэффициент вязкости;  $V$  – скорость движения потока.

Математическое моделирование нестационарного теплообмена для анизотропного тела в значительной степени затруднено из-за изменения теплофизических коэффициентов материала в процессе сушки. Предлагается для приближенного решения краевой задачи использовать метод Галёркина. Центральным элементом данного метода является весовая функция, выбираемая из семейства пробных поверочных и пробных функций из числа первых  $N$  функций некоторой полной системы, что является необходимым условием сходимости метода к точному решению при  $N \rightarrow \infty$  ( $N$  – число слагаемых пробной функции).

В качестве исходного сырья для исследования процесса сушки рыбного сырья приняты кусочки из размороженного филе бычка азовского размером 10×7×5 мм, при равномерном начальном распределении температуры  $T_0 = \text{const}$ . В начальный момент времени продукт помещается в среду псевдооживленного слоя с постоянной температурой  $T_c > T_0$ . Теплообмен между поверхностью кубика и окружающей средой происходит по закону Ньютона. Это отображает в первом приближении конвективный теплообмен, который позволяет обобщить описание процесса

на краевые задачи первого рода, когда критерий Био стремится к бесконечности. Следовательно, процесс нагрева кусочков из размороженного филе бычка азовского может быть описан краевой задачей нагревания тела при граничных условиях как первого, так и третьего рода, при последующей идентификации модели по критерию Био в эксперименте. Отчасти это положение наглядно подтверждается наличием общих точек пересечения изотермических линий (рисунок 1) иллюстрирующих задачу теплопроводности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \nabla^2 (a \cdot T), \\ T(x, y, z, 0) &= T_0, \\ -(\nabla T)_n + H(T_c - T_n) &= 0 \quad (T_c > T_n), \end{aligned} \quad (5)$$

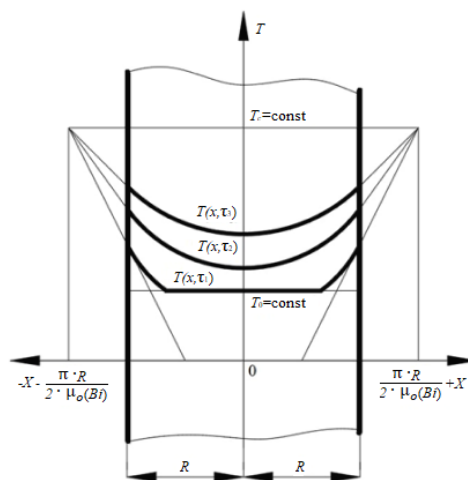


Рисунок 1. Распределение температуры в неограниченной пластине (симметричная задача)

Figure 1. Temperature distribution in an unbounded plate (symmetric problem)

В декартовой системе координат уравнение теплопроводности (5) может быть преобразовано к дифференциальному уравнению по главным осям теплопроводности анизотропных твердых тел

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (6)$$

где  $a_x, a_y, a_z$  – главные коэффициенты теплопроводности анизотропного тела.

В общем случае, количество теплоты  $dQ$ , отдаваемое потоком сушильного агента продукту определяют по закону теплоотдачи Ньютона [15]:

$$dQ = \alpha dF(t_1 - t_2) d\tau,$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $t_1, t_2$  – температура сушильного агента и продукта соответственно.

В свою очередь, конвективный теплообмен описывается уравнением Фурье [15]:

$$\frac{dt}{d\tau} + \frac{dt}{dx} V_x + \frac{dt}{dy} V_y + \frac{dt}{dz} V_z = a \nabla^2 t, \quad (7)$$

где  $V_x, V_y, V_z$  – скорости перемещения частицы в направлении осей соответственно  $x, y, z$ ;  $\nabla^2 t$  – оператор Лапласа.

Уравнение трехмерного нестационарного процесса теплопроводности Фурье (6), может быть аппроксимировано граничными условиями первого рода, при изменении характерного размера, которые предполагают приравнивание уравнения Фурье в пограничном слое внутри продукта к уравнению Ньютона в пограничном слое снаружи у поверхности продукта [15]. Рассмотрим постановку задачи (2), с учетом дальнейшей суперпозиции частных решений, в одномерном варианте неограниченной пластины, толщина которой равна  $2 \cdot R$ , м (рисунок 1). При начальном равномерном распределении температуры известно аналитическое решение [16] задачи (6) для одномерной задачи, проиллюстрированной на плоскости (неограниченная пластина), в зависимости от ориентации продольного сечения продукта, на основе суперпозиции этих решение можно получить модель анизотропного переноса тепла при обосновании процесса производства морепродуктов:

$$T(x, \tau, T_c, T_o, Bi, R_x = T_o + (T_c - T_o) \times \langle 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{2 \cdot \sin[\mu_n(Bi)]}{\mu_n(Bi) + \sin[\mu_n(Bi)] \cdot \cos[\mu_n(Bi)]} \cdot \cos \left[ \mu_n(Bi) \cdot \frac{x}{R_x} \right] \cdot \exp \left[ -\mu_n(Bi)^2 \cdot \frac{\alpha_x \cdot \tau}{R_x^2} \right] \right\} \rangle \quad (8)$$

где  $\mu_n(Bi)$  – корень характеристического уравнения аналитического решения (8);  $\text{ctg}[\mu_n] = \mu_n/Bi$ ;  $Bi$  – критерий Био  $Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}$ , характеризующий отношение интенсивности внешнего теплообмена к интенсивности внутреннего теплообмена;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена среды, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

На рисунке 1 представлена известная графическая интерпретация теплообмена граничной задачи третьего рода [17], используя которую предлагается заменить характерный размер  $\pm R$  на  $\pm \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi)}$ . Как видно из (3) температурные профили  $T(x, \tau)$  для  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$  в неограниченной пластине имеют общие точки пересечения (рисунок 1) с координатами  $\pm \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi)}$ ,  $T_c$ . Этот факт позволяет рассматривать данную краевую задачу с граничными условиями третьего рода как краевую задачу с граничными условиями первого рода при замене области существования решения от  $-R < x < R$  до области  $-\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi)} < x < \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi)}$ . В этом случае возможно применение метода Галеркина для решения задачи нагревания анизотропного тела в условиях теплообмена по закону Ньютона. Приближенное решение ищется в области  $-\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi)} < x < \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi)}$ ,

позволяющей удовлетворить однородным граничным условиям, что является обычно практикуемым приемом при реализации традиционного метода Галёркина. В этом случае для реализации метода Галёркина необходимо иметь численную оценку границы этой области от варьируемых параметров числа Био и полуширины объекта по главной оси теплопроводности (рисунок 2).

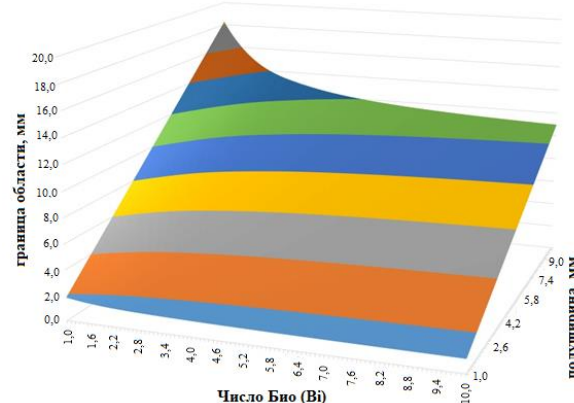


Рисунок 2. Двумерная сплайн интерполяция границы области существования решения от числа Био и полуширины объекта

Figure 2. Two-dimensional spline interpolation of the boundary of the domain of existence of the solution from the number of Bio and the half-width of the object

В этом методе предполагается, что неизвестная функция краевой задачи  $T(x, y, z, \tau)$  уравнения теплообмена может быть представлена приближенным решением, образованным суммой элементов  $\varphi(x, y, z, \tau, n)$  пробной функции, которые в данной работе представлены в следующем виде

$$\varphi(x, y, z, n) = b_n \cdot \left[ 1 - P \left( \frac{x}{\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi_x)}} \right)_{Q_{n,2}} \right] \cdot \left[ 1 - P \left( \frac{y}{\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi_y)}} \right)_{Q_{n,1}} \right] \cdot \left[ 1 - P \left( \frac{z}{\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi_z)}} \right)_{Q_{n,0}} \right] \quad (9)$$

где  $n$  – текущий номер элемента пробной функции,  $n = 0, 1, \dots, N$ ;  $N$  – общее число слагаемых пробной функции;  $\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi_x)}$ ,  $\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi_y)}$ ,  $\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi_z)}$  – полугабариты длины ширины и высоты рабочей зоны теплового процесса, м;  $P$  – полиномиальная [функция, определяемая граничными условиями краевой задачи (1), первого рода на параллелепипеде области существования решения с габаритами  $2 \cdot \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi_x)} \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi_y)} \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi_z)}$ ;  $Q$  – Булева матрица показателей степеней соответствующей полиномиальной функции (4);  $b_n$  – весовые коэффициенты пробной функции.

Решение подобного рода задач возможно путем математического моделирования с использованием PTC MathCAD [18]. В качестве примера рассмотрим реализацию метода Галёркина для одномерного варианта краевой задачи (1) в среде инженерных расчетов PTC MathCAD. Для определения весовых коэффициентов пробной функции  $b_n$  в начальный момент времени теплового процесса  $\tau = 0$  используем матричное соотношение  $B = M^{-1} \cdot V$ , где элементы вектора  $V_i$  и матрицы  $m_{i,j}$  определяются следующими выражениями:

$$v_i = \int \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_0(Bi_x)} \left[ 1 - \left( \frac{x}{\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_0(Bi_x)}} \right)^{2 \cdot i} \right] dx \quad (10)$$

$$m_{i,j} = \int \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_0(Bi_x)} \left[ 1 - \left( \frac{x}{\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_0(Bi_x)}} \right)^{2 \cdot i} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{x}{\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_0(Bi_x)}} \right)^{2 \cdot j} \right] dx \quad (11)$$

Расчет элементов вектора (10) в среде инженерных расчетов PTC MathCAD для двухэлементной пробной функции может быть представлен в виде (здесь и далее расчетные формулы приведены в виде скрин-шотов решения поставленной задачи в среде PTC MathCAD):

$$\text{simplify} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{3 \cdot \mu_0(Bi_x)} \\ \frac{4 \cdot \pi \cdot R}{5 \cdot \mu_0(Bi_x)} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Расчет элементов матрицы (12) в среде инженерных расчетов PTC MathCAD для

двухэлементной пробной функции может быть представлен в виде:

$$\text{simplify} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{8 \cdot \pi \cdot R}{15 \cdot \mu_0(Bi_x)} & \frac{64 \cdot \pi \cdot R}{105 \cdot \mu_0(Bi_x)} \\ \frac{64 \cdot \pi \cdot R}{105 \cdot \mu_0(Bi_x)} & \frac{32 \cdot \pi \cdot R}{45 \cdot \mu_0(Bi_x)} \end{pmatrix} \quad (13)$$

В этом случае весовые коэффициенты пробной функции  $b_n$  в начальный момент времени теплового процесса  $\tau = 0$  определяются из (12) и (13) матричного соотношения  $B$  реализуемого следующим модулем

$$\begin{pmatrix} \frac{8 \cdot \pi \cdot R}{15 \cdot \mu_0(Bi_x)} & \frac{64 \cdot \pi \cdot R}{105 \cdot \mu_0(Bi_x)} \\ \frac{64 \cdot \pi \cdot R}{105 \cdot \mu_0(Bi_x)} & \frac{32 \cdot \pi \cdot R}{45 \cdot \mu_0(Bi_x)} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{3 \cdot \mu_0(Bi_x)} \\ \frac{4 \cdot \pi \cdot R}{5 \cdot \mu_0(Bi_x)} \end{pmatrix} \text{simplify} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{7}{4} \\ \frac{21}{8} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Из (14) следует независимость весовых коэффициентов пробной функции  $b_n$  от области  $-\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_0(Bi)} < x < \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_0(Bi)}$ , позволяющей удовлетворить однородным граничным условиям.

В этом случае элементы матрицы переходного процесса  $D_x$  определяются следующим выражением:

$$d_{i,j} = \int \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_0(Bi_x)} \left[ 1 - \left( \frac{x}{\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_0(Bi_x)}} \right)^{2 \cdot i} \right] \cdot \frac{d^2}{dx^2} \left[ 1 - \left( \frac{x}{\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_0(Bi_x)}} \right)^{2 \cdot j} \right] dx, \quad (15)$$

Расчет элементов  $D_x$  матрицы (15) в среде инженерных расчетов PTC MathCAD для двухэлементной пробной функции может быть представлен в виде:



$$\begin{aligned}
 & q \leftarrow \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix} \\
 & \text{for } i \in 0..1 \\
 & \quad \text{for } j \in 0..1 \\
 & \quad \quad x_{i,j} \leftarrow \int_{-\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi_x)}}^{\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi_x)}} \left[ 1 - \left( \frac{x}{\pi \cdot R} \right)^{q_{i,0}} \right] \left[ \frac{d^2}{dx^2} \left[ 1 - \left( \frac{x}{\pi \cdot R} \right)^{q_{j,0}} \right] \right] dx \\
 & \quad \quad \quad \text{simplify} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{16 \cdot \mu_o(Bi_x)}{3 \cdot \pi \cdot R} & \frac{32 \cdot \mu_o(Bi_x)}{5 \cdot \pi \cdot R} \\ \frac{32 \cdot \mu_o(Bi_x)}{5 \cdot \pi \cdot R} & \frac{64 \cdot \mu_o(Bi_x)}{7 \cdot \pi \cdot R} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{16}$$

Используя элементы матрицы переходного процесса  $D$  определяемые соотношением (15) получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений, которая может быть решена численным методом, например, Эйлера реализуемым в виде матричной расчетной схемы

$$Y^{(t)} = Y^{(t-1)} + [a_x \cdot M^{-1} \cdot D_x \cdot Y^{(t-1)}] \cdot \Delta \tau \tag{17}$$

где  $Y^{<t>}$  – столбец матрицы весовых коэффициентов временных проекций пробной функции

$$\begin{pmatrix} \frac{7}{4} \\ \frac{21}{8} \end{pmatrix} + \left[ a_x \cdot \begin{pmatrix} \frac{8 \cdot \pi \cdot R}{15 \cdot \mu_o(Bi_x)} & \frac{64 \cdot \pi \cdot R}{105 \cdot \mu_o(Bi_x)} \\ \frac{64 \cdot \pi \cdot R}{105 \cdot \mu_o(Bi_x)} & \frac{32 \cdot \pi \cdot R}{45 \cdot \mu_o(Bi_x)} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \frac{16 \cdot \mu_o(Bi_x)}{3 \cdot \pi \cdot R} & \frac{32 \cdot \mu_o(Bi_x)}{5 \cdot \pi \cdot R} \\ \frac{32 \cdot \mu_o(Bi_x)}{5 \cdot \pi \cdot R} & \frac{64 \cdot \mu_o(Bi_x)}{7 \cdot \pi \cdot R} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{7}{4} \\ \frac{21}{8} \end{pmatrix} \right] \cdot \Delta \tau \text{ simplify} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{322 \cdot a_x \cdot \Delta \tau \cdot \mu_o(Bi_x)^2}{\pi^2 \cdot R^2} - \frac{7}{4} \\ \frac{21}{8} - \frac{294 \cdot a_x \cdot \Delta \tau \cdot \mu_o(Bi_x)^2}{\pi^2 \cdot R^2} \end{pmatrix} \tag{18}$$

Остальные временные проекции могут быть получены аналогично (18) из итерационной формулы (17). В теории сушки используется метод анализа тепломассообмена, основанный на 1 совместном рассмотрении конвективно-диффузионного переноса паров влаги и температуры в потоке теплоносителя. В предлагаемой модели учет изменения влажности продукта связывается с изменением температуры рыбного сырья приняты кубики из размороженного филе бычка азовского размером  $7 \times 7 \times 7$  мм, что

$$\phi(x, Bi_x, y, Bi_y, z, Bi_z, n) := \left( 1 - P_{2n} \left( \frac{z}{L(Bi_z)} \right) \right)_{Q_{n,0}} \cdot \left( 1 - P_{2n} \left( \frac{y}{L(Bi_y)} \right) \right)_{Q_{n,1}} \cdot \left( 1 - P_{2n} \left( \frac{x}{L(Bi_x)} \right) \right)_{Q_{n,2}}, \tag{19}$$

где  $L(Bi_x)$ ,  $L(Bi_y)$ ,  $L(Bi_z)$  – полу габариты области существования решения по трем главным осям теплопроводности, определяемые соотношением  $\frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \mu_o(Bi)}$ .

Булева матрица показателей степеней этих квадратичных функций (19) имеет следующий вид:

$$Q^T = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \tag{20}$$

на шаге численного интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений, полученных из одномерной краевой задачи.

Используя соотношения (12), (13) и (16) первый шаг численного интегрирования по схеме (17) может быть представлен модулем:

требует перехода от одномерной модели к её объемной реализации, учитывающей возможность использования аналитических зависимостей расчета элементов матрицы и векторов используемого и описанного выше одномерного метода Галеркина в среде инженерных расчетов РТС MathCAD. В этом случае использована весовая функция из двух квадратичных функций

$P_{2n}(x) := \left( \frac{x^2}{x^4} \right)$  второго и четвертого порядка:

В этом случае весовые коэффициенты при квадратичных функциях, задаваемых Булевой матрицей (20) принимают следующие значения:

$$B^T = \begin{pmatrix} -\frac{343}{64} & \frac{1029}{128} & \frac{1029}{128} & -\frac{3087}{256} & \frac{1029}{128} & -\frac{3087}{256} & -\frac{3087}{256} & \frac{9261}{512} \end{pmatrix} \tag{21}$$

Матрицы переходного процесса, используемые для численного интегрирования краевой задачи (6) соответственно принимают следующий вид:

$$MD_x(Bi_x) := \frac{1}{2 \cdot L(Bi_x)^2} \cdot \begin{pmatrix} 7 & 0 & 0 & 0 & 66 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 0 & 0 & 0 & 66 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 0 & 0 & 0 & 66 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7 & 0 & 0 & 0 & 66 \\ -\frac{21}{2} & 0 & 0 & 0 & -63 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{21}{2} & 0 & 0 & 0 & -63 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{21}{2} & 0 & 0 & 0 & -63 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{21}{2} & 0 & 0 & 0 & -63 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$MD_y(Bi_y) := \frac{1}{2 \cdot L(Bi_y)^2} \cdot \begin{pmatrix} 7 & 0 & 66 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 0 & 66 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{21}{2} & 0 & -63 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{21}{2} & 0 & -63 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 & 66 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 & 66 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{21}{2} & 0 & -63 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{21}{2} & 0 & -63 \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$MD_z(Bi_z) := \frac{1}{2 \cdot L(Bi_z)^2} \cdot \begin{pmatrix} 7 & 66 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{21}{2} & -63 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 66 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{21}{2} & -63 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 66 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{21}{2} & -63 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 66 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{21}{2} & -63 \end{pmatrix} \quad (24)$$

где  $MD_x$ ,  $MD_y$ ,  $MD_z$  – матрицы переходного процесса по трем главным осям теплопроводности;  $Bi_x$ ,  $Bi_y$ ,  $Bi_z$  – числа Био по этим координатным осям.

Использование матрицы переходного процесса (16), (17) и (18) позволяет провести численное интегрирование весовых коэффициентов

$$Y^{(0)} := B \quad Y^{(t)} := Y^{(t-1)} + \left[ a_x \cdot (MD_x(Bi_x) \cdot Y^{(t-1)}) + a_y \cdot (MD_y(Bi_y) \cdot Y^{(t-1)}) + a_z \cdot (MD_z(Bi_z) \cdot Y^{(t-1)}) \right] \cdot \Delta \tau \quad (19)$$

Используемая итерационная схема численного интегрирования (19) позволяет получить

решение задачи температурного поля (2) с приемлемой для инженерных расчетов точностью

$$\Psi \tau(x, y, z, t) := T_o + (T_c - T_o) \cdot \left[ 1 - \sum_{n=0}^{rows(Q)-1} \left[ (Y^{(t)})_n \cdot \phi(x, Bi_x, y, Bi_y, z, Bi_z, n) \right] \right] \quad (25)$$

Используя выше изложенную расчетную схему краевой задачи (6) с граничными условиями третьего рода для моделирования предварительного прогрева влажного материала в процессе его тепловой обработки (20) до

момента нагрева поверхности пластины выше температуры фазового перехода испарения влаги определили значения усредненной влажности в процессе испарительной сушки

$$W_{cp} = W_K + \frac{(W_H - W_K) \cdot \int_0^R \int_0^R \int_0^R (\Phi(100^\circ C - \Psi \tau(x, y, z, \tau))) dx dy dz}{2 \cdot R \cdot 2 \cdot R \cdot 2 \cdot R} \quad (26)$$

где  $w_h$ ,  $w_k$  – начальное и конечное влагосодержание материала в процессе испарительной сушки,  $\Phi$  – функция Хевисайда.

Таким образом, использование интегрального показателя влагосодержания материала (21) позволяет идентифицировать параметры процесса испарительной сушки по изменению этого показателя во времени.

### Результаты и обсуждение

В качестве исходного сырья для исследования процесса сушки рыбного сырья приняты кубики из размороженного филе бычка азовского размером  $7 \times 7 \times 7$  мм, характеризующегося следующими теплофизическими параметрами коэффициент теплопроводности  $a = 0,43$  (Вт/(м·К)), удельная теплоемкость  $c = 3670$  (Дж/(кг·К)) и плотность  $\rho = 930$  кг/м<sup>3</sup>. В результате идентификации математической модели с использованием экспериментальных данных были получены

следующие зависимости изменения влагосодержания и температуры материала в процессе сушки (рисунок 3).

Использование расчетной схемы краевой задачи (6) с граничными условиями третьего рода для идентификации параметров модели процесса сушки основано на численном интегрировании с использованием матриц переходного процесса (16), (17) и (18). Учитывая полученные значения (22) коэффициентов температуропроводности с учетом геометрии объекта получаем возможность построить изменения влагосодержания в процессе испарительной сушки (рис. 3) от параметров идентификации модели – координатных чисел Био ( $Bi_x$ ,  $Bi_y$ ,  $Bi_z$ ) и коэффициентов температуропроводности ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ) входящих в пробную функцию температурного поля (20), формируемую векторами матрицы  $Y$ , определяемыми матрицами переходного процесса по трем главным осям теплопроводности (16), (17) и (18).

В качестве дополнительной зависимости, построенной по изменению влагосодержания продукта в процессе сушки средствами математического моделирования с использованием идентифици-

рованных показателей (22) восстановлена зависимость изменения температуры материала от времени процесса (рисунок 3).

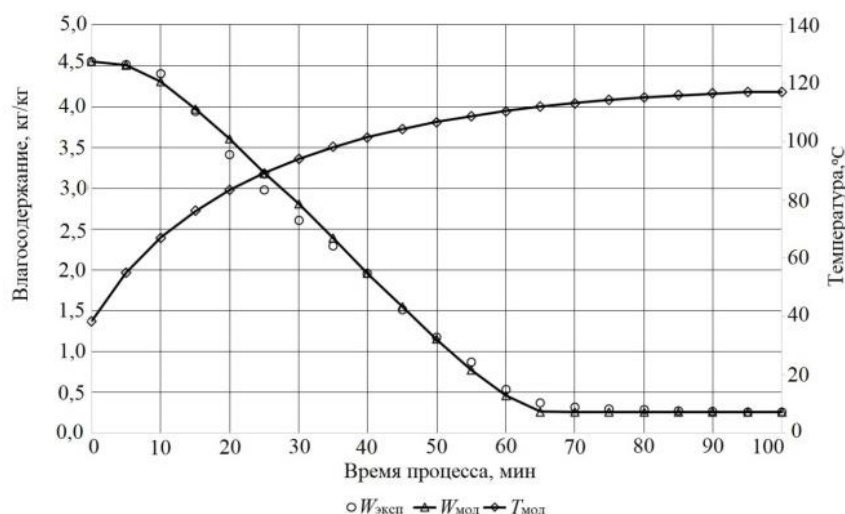


Рисунок 3. Идентификация модели по экспериментальным данным

Figure 3. Identification of the model based on experimental data

Результаты расчета по этим данным в среде инженерных расчетов PTC MathCAD

коэффициента температуропроводности дают следующую усредненную оценку этих показателей:

$$\begin{aligned}
 c_G &:= 3670 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{удельная теплоемкость} & \rho_G &:= 930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{плотность} & R_G &:= \frac{7}{2} \text{ mm} \quad \text{полуширина пластины} \\
 a_x &:= 1.272 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{коэффициент температуропроводности} & a_x &= \frac{\lambda_x}{c_G \cdot \rho_G} \quad \text{solve, } \lambda_x \rightarrow \frac{0.0043414632 \cdot \text{J}}{\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}} = 4.341 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{коэффициент теплопроводности} \\
 Bi_x &:= 5.45 \quad \text{Критерий Бю} & \frac{\alpha_x}{4.341 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} \cdot R_G &= Bi_x \quad \text{solve, } \alpha_x \rightarrow \frac{0.0067595571428571428571 \cdot \text{W}}{\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}} = 6.76 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{коэффициент теплообмена} \\
 a_y &:= 1.552 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{коэффициент температуропроводности} & a_y &= \frac{\lambda_y}{c_G \cdot \rho_G} \quad \text{solve, } \lambda_y \rightarrow \frac{0.0052971312 \cdot \text{J}}{\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}} = 5.297 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{коэффициент теплопроводности} \\
 Bi_y &:= 3.15 \quad \text{Критерий Бю} & \frac{\alpha_y}{5.297 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} \cdot R_G &= Bi_y \quad \text{solve, } \alpha_y \rightarrow \frac{0.0047673 \cdot \text{W}}{\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}} = 4.767 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{коэффициент теплообмена} \\
 a_z &:= 1.147 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{коэффициент температуропроводности} & a_z &= \frac{\lambda_z}{c_G \cdot \rho_G} \quad \text{solve, } \lambda_z \rightarrow \frac{0.0039148257 \cdot \text{J}}{\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}} = 3.915 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{коэффициент теплопроводности} \\
 Bi_z &:= 8.22 \quad \text{Критерий Бю} & \frac{\alpha_z}{3.915 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} \cdot R_G &= Bi_z \quad \text{solve, } \alpha_z \rightarrow \frac{0.0091946571428571428571 \cdot \text{W}}{\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}} = 9.195 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{коэффициент теплообмена}
 \end{aligned} \tag{27}$$

### Закключение

Установлено (рисунок 3), что при равномерном начальном распределении температуры в процессе предварительного прогрева температурная неоднородность возрастает вплоть до момента фазового перехода (100 °C) на поверхности высушиваемого объекта. Таким образом, уже предварительное моделирование показало важность учета фазы предварительного прогрева влажного материала, так как на этой стадии формируется температурный профиль, отличающийся значительной неоднородностью, что особо важно, так как температурная неоднородность непосредственно влияет на качество пищевого продукта. Подтверждена возможность учета

анизотропии в процессах теплообмена при использовании объемной математической модели переноса с распределенными параметрами.

Предложенная математическая модель процесса сушки снеков из фарша бычка азоского в псевдооживленном слое позволяет по гравиметрическим данным динамики среднего влагосодержания восстанавливать динамику прогрева высокобелкового продукта. Это является основой для понимания процессов термообработки на основе существующих концепций денатурации белковой составляющей морепродуктов. Использование этих восстановленных данных температуры и влажности в дальнейшем позволит оптимизировать технологические режимы термообработки пищевого сырья.



## Литература

- 1 Ustinova M.E., Yashonkov A.A. Experimental studies into the kinetics of the process of vacuum drying of carrot chips // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 640.
- 2 Gukasyan A.V., Koshevoy E.P., Kosachev V.S. Two-dimensional mathematical model of oil-bearing materials in extrusion-type transportation over rectangular screw core // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1015.
- 3 Кошевой Е.П., Косачев В.С., Меретуков З.А. Теоретическое рассмотрение деформирования материала на выходе экструдера // Известия высших учебных заведений // Пищевая технология. 2004. № 5–6. С. 86–88.
- 4 Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Термодинамический подход в теории сушки // Известия высших учебных заведений // Пищевая технология. 2015. № 4. С. 88–91.
- 5 Netto J.D.P.C., Oliveira Filho P.R.C.D., Lapa-Guimarães J., Viegas E.M.M. Physicochemical and sensory characteristics of snack made with minced Nile tilapia // Food Science and Technology. 2014. V. 34. P. 591-596. doi: 10.1590/1678-457x.6395
- 6 Wang Y., Zhang M., Mujumdar A.S., Mothibe K.J. Quality changes of dehydrated restructured fish product from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) as affected by drying methods // Food and bioprocess technology. 2013. V. 6. №. 7. P. 1664-1680. doi: 10.1007/s11947-012-0812-y
- 7 Dementieva N.V., Boitsova T.M., Bogdanov V.D. A study of combined minced meat from hydrobionts for snacks // Czech Journal of Food Sciences. 2021. V. 39. №. 2. P. 140-148. doi: 10.17221/264/2020-CJFS
- 8 Pokholchenko V., Smirnova A. Energy efficient systems and regimes at fish products drying processes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. V. 302. №. 1. P. 012027.
- 9 Nawaz A., Khalifa I., Walayat N., Lorenzo J.M. et al. Whole fish powder snacks: Evaluation of structural, textural, pasting, and water distribution properties // Sustainability. 2021. V. 13. №. 11. P. 6010. doi: 10.3390/su13116010
- 10 Nawaz A., Xiong Z., Li Q., Xiong H. et al. Evaluation of physicochemical, textural and sensory quality characteristics of red fish meat-based fried snacks // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2019. V. 99. №. 13. P. 5771-5777.
- 11 Ganesan P., Rathnakumar K., Nicy B.A., Vijayarahavan V. Improvement of nutritional value of extruded snack product by incorporation of blanched dried fish powder from sardine and Lizard fish and selection by organoleptic evaluation // Journal of Entomology and Zoology Studies. 2017. V. 5. №. 6. P. 2552-2554.
- 12 Yean Y.S., Pruthiarenun R., Doe P., Motohiro T. et al. Dried and smoked fish products // Fish Drying & Smoking. Routledge, 2017. P. 47-87.
- 13 Wang Y., Zhang M., Mujumdar A. S. Effect of cassava starch gel, fish gel and mixed gels and thermal treatment on structure development and various quality parameters in microwave vacuum-dried gel slices // Food Hydrocolloids. 2013. V. 33. №. 1. P. 26-37. doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.02.005
- 14 Kamari S., Shabanpour B. Development and sensory evaluation of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fish based snack food // World Journal of Fish and Marine. 2013. V. 5. №. 6. P. 670-673.
- 15 Ponwiboon N., Rojanakorn T. Desorption isotherms and drying characteristics of Nile tilapia fish sheet // International Food Research Journal. 2017. V. 24. №. 3. P. 1292.
- 16 Yashonkov A., Sukmnov V. Experimental determination of the rational parameters in the process of foaming and drying of raw fish // Food and Packaging. P. 55.
- 17 Shaviklo G.R., Thorkelsson G., Sveinsdottir K., Pourreza F. Studies on processing, consumer survey and storage stability of a ready-to-reconstitute fish cutlet mix // Journal of food science and technology. 2013. V. 50. №. 5. P. 900-908. doi: 10.1007/s13197-011-0417-x
- 18 Stepanov D.V., Gukasyan A.V., Kosachev V.S., Oleynikova R.E. Solution of the Burgers Shock wave equation in PTC MATHCAD // Procedia computer science International Conference on Computational Intelligence and Data Science, ICCIDS 2019. 2020. pp. 1088–1095.
- 19 Kouhila M., Moussaoui H., Lamsyehe H., Tagnamas Z. et al. Drying characteristics and kinetics solar drying of Mediterranean mussel (*mytilus galloprovincialis*) type under forced convection // Renewable Energy. 2020. V. 147. P. 833-844. doi: 10.1016/j.renene.2019.09.055
- 20 Ospanov A., Muslimov N., Timurbekova A., Mamayeva L. et al. The effect of various dosages of poly-cereal raw materials on the drying speed and quality of cooked pasta during storage // Current Research in Nutrition and Food Science. 2020. V. 18(2). P. 462–470. doi: 10.12944/CRNFSJ.8.2.11
- 21 Зуев А.В. О периодических решениях обыкновенных дифференциальных уравнений с разрывной правой частью // Математические заметки. 2006. Т. 79. № 4. С. 560–570.
- 22 Дворянинова О.П., Соколов А.В. Моделирование процесса сушки вторичных продуктов разделки рыб и описание в модели основных процессов тепло- и влагопереноса // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 2. С. 125–129. doi: 10.20914/2310-1202-2018-2-125-129


## References

- 1 Ustinova M.E., Yashonkov A.A. Experimental studies into the kinetics of the process of vacuum drying of carrot chips. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. vol. 640.
- 2 Gukasyan A.V., Koshevoy E.P., Kosachev V.S. Two-dimensional mathematical model of oil-bearing materials in extrusion-type transportation over rectangular screw core. Journal of Physics: Conference Series. 2018. vol. 1015.
- 3 Koshevoy E.P., Kosachev B.C., Meretukov Z.A. Theoretical consideration of the deformation of the material at the exit of the extruder. News of higher educational institutions. Food technology. 2004. No. 5–6. pp. 86–88. (in Russian).
- 4 Podgorny S.A., Koshevoy E.P., Kosachev V.S. Thermodynamic approach in the theory of drying // News of higher educational institutions. Food technology. 2015. no. 4. pp. 88–91. (in Russian).
- 5 Netto J.D.P.C., Oliveira Filho P.R.C.D., Lapa-Guimarães J., Viegas E.M.M. Physicochemical and sensory characteristics of snack made with minced Nile tilapia. Food Science and Technology. 2014. vol. 34. pp. 591-596. doi: 10.1590/1678-457x.6395
- 6 Wang Y., Zhang M., Mujumdar A.S., Mothibe K.J. Quality changes of dehydrated restructured fish product from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) as affected by drying methods. Food and bioprocess technology. 2013. vol. 6. no. 7. pp. 1664-1680. doi: 10.1007/s11947-012-0812-y


- 7 Dementieva N.V., Boitsova T.M., Bogdanov V.D. A study of combined minced meat from hydrobionts for snacks. Czech Journal of Food Sciences. 2021. vol. 39. no. 2. pp. 140-148. doi: 10.17221/264/2020-CJFS
- 8 Pokholchenko V., Smirnova A. Energy efficient systems and regimes at fish products drying processes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. vol. 302. no. 1. pp. 012027.
- 9 Nawaz A., Khalifa I., Walayat N., Lorenzo J.M. et al. Whole fish powder snacks: Evaluation of structural, textural, pasting, and water distribution properties. Sustainability. 2021. vol. 13. no. 11. pp. 6010. doi: 10.3390/su13116010
- 10 Nawaz A., Xiong Z., Li Q., Xiong H. et al. Evaluation of physicochemical, textural and sensory quality characteristics of red fish meat-based fried snacks. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2019. vol. 99. no. 13. pp. 5771-5777.
- 11 Ganesan P., Rathnakumar K., Nicy B.A., Vijayarahavan V. Improvement of nutritional value of extruded snack product by incorporation of blanched dried fish powder from sardine and Lizard fish and selection by organoleptic evaluation. Journal of Entomology and Zoology Studies. 2017. vol. 5. no. 6. pp. 2552-2554.
- 12 Yean Y.S., Pruthiarenun R., Doe P., Motohiro T. et al. Dried and smoked fish products. Fish Drying & Smoking. Routledge, 2017. pp. 47-87.
- 13 Wang Y., Zhang M., Mujumdar A. S. Effect of cassava starch gel, fish gel and mixed gels and thermal treatment on structure development and various quality parameters in microwave vacuum-dried gel slices. Food Hydrocolloids. 2013. vol. 33. no. 1. pp. 26-37. doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.02.005
- 14 Kamari S., Shabanpour B. Development and sensory evaluation of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fish based snack food. World Journal of Fish and Marine. 2013. vol. 5. no. 6. pp. 670-673.
- 15 Ponwiboon N., Rojanakorn T. Desorption isotherms and drying characteristics of Nile tilapia fish sheet. International Food Research Journal. 2017. vol. 24. no. 3. pp. 1292.
- 16 Yashonkov A., Sukmnov V. Experimental determination of the rational parameters in the process of foaming and drying of raw fish. Food and Packaging. pp. 55.
- 17 Shaviklo G.R., Thorkelsson G., Sveinsdottir K., Pourreza F. Studies on processing, consumer survey and storage stability of a ready-to-reconstitute fish cutlet mix. Journal of food science and technology. 2013. vol. 50. no. 5. pp. 900-908. doi: 10.1007/s13197-011-0417-x
- 18 Stepanov D.V., Gukasyan A.V., Kosachev V.S., Oleynikova R.E. Solution of the Burgers Shock wave equation in PTC MATHCAD. Procedia computer science International Conference on Computational Intelligence and Data Science, ICCIDS 2019. 2020. pp. 1088-1095.
- 19 Kouhila M., Moussaoui H., Lamsyehe H., Tagnamas Z. et al. Drying characteristics and kinetics solar drying of Mediterranean mussel (*mytilus galloprovincialis*) type under forced convection. Renewable Energy. 2020. vol. 147. pp. 833-844. doi: 10.1016/j.renene.2019.09.055
- 20 Ospanov A., Muslimov N., Timurbekova A., Mamayeva L. et al. The effect of various dosages of poly-cereal raw materials on the drying speed and quality of cooked pasta during storage. Current Research in Nutrition and Food Science. 2020. vol. 18(2). pp. 462-470. doi: 10.12944/CRNFSJ.8.2.11
- 21 Zuev A.V. On periodic solutions of ordinary differential equations with a discontinuous right-hand side. Mathematical notes. 2006. vol. 79. no. 4. pp. 560-570. (in Russian).
- 22 Dvoryaninova O.P., Sokolov A.V. Simulation of the drying process of secondary products of fish cutting and description in the model of the main processes of heat and moisture transfer. Proceedings of VSUET. 2018. vol. 80. no. 2. pp. 125-129. doi: 10.20914/2310-1202-2018-2-125-129 (in Russian).

#### Сведения об авторах


**Вячеслав С. Косачев** д.т.н., профессор, профессор кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, Кубанский государственный технологический университет, ул. Красная, 135, 2-й этаж, ауд. 253, г. Краснодар, 350072, Россия, vs.kosachev@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-2582-8547>

**Александр Н. Остриков** д.т.н., профессор, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ostrikov27@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

**Александр А. Яшонков** к.т.н., доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств, Керченский государственный морской технологический университет, ул. Орджоникидзе, д. 123, г. Керчь, 298309, Республика Крым, Россия, jashonkov@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1431-679X>

#### Вклад авторов

**Вячеслав С. Косачев** консультация в ходе исследования

**Александр Н. Остриков** выполнил расчёты


**Александр А. Яшонков** участие в разработке конструкторской документации, консультация в ходе исследования

#### Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Information about authors


**Vyacheslav S. Kosachev** Dr. Sci. (Engin.), professor, technological equipment and life-support systems department, Kuban State Technological University, 350072, Krasnodar Krai, Krasnodar, Moskovskaya str., 2., vs.kosachev@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-2582-8547>

**Alexander N. Ostrikov** Dr. Sci. (Engin.), professor, technologies of fats, processes and devices of chemical and food production, department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ostrikov27@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

**Alexandr A. Yashonkov** Cand. Sci. (Engin.), machines and apparatuses of food production, department, Kerch State Maritime Technological University, 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str. 82, jashonkov@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1431-679X>

#### Contribution

**Vyacheslav S. Kosachev** consultation during the study

**Alexander N. Ostrikov** completed the calculations

**Alexandr A. Yashonkov** participation in the development of design documentation, consultation during the study

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 10/04/2022	После редакции 12/05/2022	Принята в печать 31/05/2022
Received 10/04/2022	Accepted in revised 12/05/2022	Accepted 31/05/2022