

Научная статья

УДК 664.8/.9+ 66-93

DOI: 10.17586/2310-1164-2026-19-2-3-15

Разработка алгоритма воспроизведения частных диффузионных зависимостей процессов копчения и сушки рыбы расчетным методом

В.А. Похольченко^{1*}, А.М. Ершов¹, В.В. Пеленко², Л.А. Мишанина¹¹Мурманский арктический университет, Россия, Мурманск, *pokholchenkova@mauniver.ru²Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург

Аннотация. Изучали распределение влажности и температуры по толщине рыб различного размерно-массового и видового состава в процессе их тепловой обработки копчением и сушкой горячим и полугорячим способами. Предложены новые критерии диффузионного подобия для процессов обезвоживания и нагревания рыбы с целью сведения множества частных зависимостей в обобщенные диффузионную и термодиффузионную зависимости в безразмерных координатах. Полученные закономерности открывают возможность определять коэффициенты диффузии и термодиффузии в рыбе при ее обезвоживании и нагреве расчетным способом. Последующий анализ диффузионных свойств объектов обработки при минимальных затратах на поисковые работы существенно упрощает разработку оптимальных режимов тепловой обработки рыбы. На основе полученных диффузионных закономерностей процессов полугорячей и горячей сушки, полугорячего и горячего копчения рыбы предложены обобщенные математические модели. Применение полученных закономерностей протекания диффузионных процессов позволяет расчетным путем определять коэффициенты диффузии и термодиффузии влаги в рыбе при ее тепловой обработке в любой период процесса обезвоживания и нагревания в зависимости от режимных параметров сушильного агента, геометрических размеров и начальной влажности сырья.

Ключевые слова: тепловая обработка; рыбное сырье; обезвоживание; нагревание; диффузия; термодиффузия; подобие процессов; обобщенная зависимость

Original article

Algorithm for reproducing partial diffusion dependences of fish smoking and drying processes: design by calculation method

Vyacheslav A. Pokholchenko^{1*}, Alexander M. Ershov¹, Valery V. Pelenko², Ludmila A. Mishanina¹¹Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia, *pokholchenkova@mauniver.ru²St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russia

Abstract. The distribution of moisture and temperature across the thickness of fish of varying size, weight, and species composition was studied during their heat treatment by smoking and drying using hot and semi-hot methods. New diffusion similarity criteria were proposed for fish dehydration and heating processes with the purpose of reducing numerous individual relationships into generalized diffusion and thermal diffusion relationships in dimensionless coordinates. The resulting patterns enable the calculation of diffusion and thermal diffusion coefficients in fish during dehydration and heating. Subsequent analysis of the diffusion properties of the processed objects, with minimal research work, significantly simplifies the development of optimal fish heat treatment regimes. Generalized mathematical models are proposed based on the obtained diffusion patterns for semi-hot and hot drying, semi-hot and hot smoking of fish. The application of the obtained patterns of diffusion processes allows to determine by calculation the coefficients of diffusion and thermal diffusion of moisture in fish during its heat treatment at any process time, depending on the operating parameters of the drying agent, the geometric dimensions and the initial moisture content of the raw material.

Keywords: heat treatment; fish raw materials; dehydration; heating; diffusion; thermal diffusion; similar processes; generalized dependence

Введение

Актуальность исследования обусловлена высокой потребностью производителей в снижении расходов энергетических и материальных ресурсов технологических линий переработки биоресурсов в условиях роста цен на электроэнергию, сокращения поставок ряда объектов водного промысла на береговые предприятия в силу объективных причин. На перерабатывающих линиях одной из основных операций является тепловая обработка пищевого сырья с использованием различных способов обезвоживания, что относится к энергозатратным процессам, требующим оптимизации.

Разработка эффективных режимов удаления влаги из рыбы и других пищевых продуктов в ходе тепловой обработки в значительной мере опирается на закономерности, которые наблюдаются при сушке капиллярно-пористых коллоидных тел. Решение дифференциальных уравнений, описывающих перенос тепла и массы, чаще всего выполнялось для граничных условий первого рода, хотя на практике тепловая обработка рыбного сырья нередко осуществляется при граничных условиях третьего рода [1–3]. При изучении динамики процесса коэффициенты диффузии влаги принимались либо как средние значения за весь период, либо как средние для первой и второй фаз этапа падающей скорости обезвоживания [4, 5].

Из ряда работ [6, 7] следует, что диффузионные свойства влажных материалов по мере удаления влаги ухудшаются, достигая минимальных значений к завершению процесса. Величины коэффициентов диффузии влаги в пищевых материалах могут зависеть от химического состава, геометрических параметров тела и условий проведения режима [4–6]. Однако имеющихся данных для проведения системного анализа недостаточно.

В трудах некоторых исследователей [7–11] подчеркивается, что более важным фактором при реализации того или иного процесса является снижение удельного расхода энергии. Этот показатель приобретает особую значимость в условиях конкуренции, превышая потребность сокращения времени обработки.

В публикациях, посвященных изучению процессов обезвоживания пищевых продуктов [6–9], можно выделить различные подходы к обобщению кривых кинетики удаления влаги. Разработаны методы расчета кинетики обезвоживания пищевых материалов, основанные на общих закономерностях процессов. Тем не менее, для рыбной промышленности указанные методы находят ограниченное применение, и их использование не позволяет обобщить закономерности переноса тепла и массы в сырье при различных режимах и способах подвода энергии.

С целью уменьшения числа экспериментов учеными разработан ряд методов расчета кинетики обезвоживания, которые базируются на общих закономерностях процессов [12–14].

Для эффективного управления процессами обезвоживания и нагрева рыбы необходимо знать распределение полей температуры и влажности во времени. Определение коэффициентов влагопроводности и термовлагопроводности рыбы опытным путем представляется достаточно сложным и трудоемким процессом [4, 5, 12], поэтому установить диффузионные свойства рыбы при минимальном числе экспериментов имеет большое значение.

При нагревании материала одновременно происходят три взаимосвязанных процесса тепло- и массопереноса: передача тепловой энергии внутри материала посредством теплопроводности; перемещение влаги в структуре материала, обусловленное влагопроводностью (также называемой потенциалопроводностью влагопереноса); и термодиффузия, определяющая термовлагопроводность. Термовлагопроводность в общем случае характеризует способность влажного материала к переносу влаги под воздействием градиента температур [5].

Тепловая обработка пищевого сырья обезвоживанием относится к самым энергозатратным технологическим операциям и при этом составляет основу многих перерабатывающих линий. В связи с этим необходима разработка процессов и технологий на основе знаний закономерностей их протекания и получения обобщенных зависимостей. Это обеспечит снижение себестоимости готовой продукции и повысит эффективность применения технологического оборудования.

Известно, что процесс обезвоживания пищевых материалов сопровождается переходом от влаги с меньшей энергией связи к большей. При этом кривые кинетики обезвоживания содержат критические точки, соответствующие переходам между различными формами связи влаги с веществом. Таких критических точек на кривых кинетики обезвоживания может быть от одной до нескольких. Например, при обезвоживании рыбного сырья установлено наличие двух критических влажностей независимо от характера теплового воздействия на объект обработки. Между ними показана четкая взаимосвязь на кривых кинетики обезвоживания с химическим составом рыбы [12–14].

На базе безразмерных критериев подобия нами разработаны [13, 14] обобщенные математические зависимости кинетики обезвоживания рыбного сырья и головоногих моллюсков при воздействии теплового агента в широком диапазоне температур в процессах полуторячей, горячей сушки и копчения,

инфракрасной сушки и обжаривания. Однако для изучения и анализа диффузионных свойств рыбного сырья, имеется недостаточно сведений, представленных в основном лишь частными зависимостями, а предложенные методы [1, 2, 5, 10] имеют ограниченное применение и их использование не способствует выявлению диффузионных закономерностей в данном сырье при различных режимах и способах энергоподвода [4, 5, 8].

Цель данного исследования – анализ и обобщение диффузионных закономерностей в рыбе при ее обезвоживании и нагревании в процессах копчения и сушки с разработкой алгоритма воспроизведения частных диффузионных зависимостей расчетным методом.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

- изучить распределение влажности и температуры по толщине рыб с разными технологическими параметрами в зависимости от продолжительности их тепловой обработки;
- определить коэффициенты диффузии и термодиффузии в рыбе в процессе обезвоживания и нагрева;
- провести анализ динамики изменения диффузионных характеристик рыбы в процессах копчения и сушки горячим и полугорячим способами;
- оценить возможность обобщения полученных диффузионных закономерностей и описания подобия исследуемых процессов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выбрано мороженое сырье различного видового, размерно-массового и химического состава: скумбрия атлантическая (*Scomber scombrus*), горбуша (*Oncorhynchus gorbusha*), зубатка пятнистая (*Anarhichas minor*), пикша (*Melanogrammus aeglefinus*), треска атлантическая (*Gadus morhua*) с предельным сроком хранения не более трех месяцев при температуре не выше минус 18°C. Данные виды являются основными объектами водного промысла и хорошим сырьем для производства копченой, сушеной продукции и консервов с предварительной тепловой обработкой.

Опытно-практическая составляющая исследований реализована с использованием ресурсов учебно-экспериментального цеха, а также лабораторной и экспериментальной базы кафедры технологического и холодильного оборудования Мурманского арктического университета.

Изучение кинетических характеристик процессов обезвоживания и нагрева рыбы проводилось с учетом воздействия каждого из ключевых параметров на ход процесса: начальной влажности рыбного сырья ω , %; его удельной поверхности S/m , м²/кг; температуры T , К; относительной влажности ϕ , %; скорости циркуляции v , м/с сушильного агента в камере тепловой обработки.

Опыты объединялись в серии, в каждой из которых варьировался изучаемый фактор, влияющий на ход процесса, в установленных пределах, остальные параметры сохраняли неизменными во времени. Например, при исследовании влияния на характер процесса начальной влажности рыбного сырья, характеризующей видовой и химический состав объекта обработки, постоянными оставались такие параметры, как удельная поверхность, определяющая размерно-массовые характеристики объекта; тепло-влажностные характеристики – температура и относительная влажность в камере, а также скорость циркуляции сушильного агента, как аэродинамический показатель. В последующих сериях опытов начальную влажность сырья и режимные параметры в камере сохраняли постоянными, учитывая влияние на характер процесса обезвоживания удельной поверхности. Аналогично изучали влияние режимных параметров на процесс при постоянстве размерно-массовых характеристик и начальной влажности сырья.

Режимы полугорячей сушки и копчения проводили при температуре сушильного агента в камере $(65 \pm 1)^\circ\text{C}$, относительной влажности $(43 \pm 2)\%$, скорости циркуляции $(4,0 \pm 0,5)$ м/с. Режимы горячей сушки и копчения осуществляли при температуре сушильного агента $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$, относительной влажности $(20 \pm 2)\%$, скорости циркуляции $(4,8 \pm 0,5)$ м/с.

Начальные, конечные и промежуточные показатели влажности объектов сушки в ходе процесса обезвоживания устанавливали арбитражным методом путем высушивания при 105°C и через каждые 5 мин фиксировали потери влаги пищевым материалом. Для определения удельной поверхности рыбы у исследуемых образцов находили площадь поверхности на миллиметровой бумаге и соответствующую им массу.

Текущая влажность для каждого этапа обезвоживания ω_i (%) определялась по формуле

$$\omega_i = \frac{\omega_0 - x^n}{1 - \frac{x^n}{100}},$$

где ω_0 – влажность образца в начале периода обезвоживания, %;

x^n – потери массы, %, через заданный период времени.

Потери массы x^n (%) определяли по формуле

$$x^n = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \cdot 100,$$

где m_0 и m_i – масса образцов в начале и конце периодов обезвоживания соответственно, кг.

Полученные значения влажности на общую массу рыбы ω^0 (%) переводили в соответствующее значение абсолютно сухого материала ω^c , %, по формуле

$$\omega^c = \frac{\omega^0}{100 - \omega^0} \cdot 100.$$

Далее в работе каждая влажность материала приводится в пересчете на абсолютно сухое вещество.

На основе полученных результатов строили графические зависимости изменения влажности рыбы от времени процесса обезвоживания $\omega^c = f(\tau)$.

Критическую влажность ω_{k1}^c и ω_{k2}^c (%) при обезвоживании рыбы определяли по известным уравнениям [12–14]:

$$\omega_{k1}^c = 1,069\omega_0^{0,969}; \quad (1)$$

$$\omega_{k2}^c = 0,784\omega_0^c + 2, \quad (2)$$

где ω_0^c – исходное содержание влаги в материале, выраженное в пересчете на сухое вещество, %.

Из выражений (1) и (2) видно, что критические влажности при обезвоживании рыбного сырья в общем случае зависят лишь от его начального влагосодержания.

Поток влаги q_m (кг/(м²·с)) при обезвоживании в общем случае, выражается как

$$q_m = q_{mU} + q_{m\theta} = -a_m \rho_0 \nabla U - a_m \rho_0 \delta \nabla \Theta, \quad (3)$$

где q_{mU} – плотность потока диффузии влаги, кг/(м²·с);

$q_{m\theta}$ – плотность потока термодиффузии влаги, кг/(м²·с);

ρ_0 – масса абсолютно сухого вещества в единице влажного тела, кг с.в./м³;

∇U – градиент влагосодержания, кг/(кг с.в. м);

$\nabla \Theta$ – градиент температуры, °С/м;

a_m – коэффициент диффузии влаги, м²/с;

δ – относительный коэффициент термодиффузии влажного материала, кг/(кг с.в. м) [5, 12].

Коэффициент диффузии влаги a_m (м²/с) определяли экспериментальным путем и рассчитывали с использованием основного закона теплопроводности

$$a_m = \frac{1}{S \rho_0} \frac{\frac{\partial m}{\partial \tau}}{\frac{\partial U}{\partial x}},$$

где $\frac{\partial m}{\partial \tau}$ – скорость удаления влаги (поток влаги), кг/с;

$\frac{\partial U}{\partial x}$ – градиент влагосодержания по толщине образца, кг/(кг с.в. м);

S – площадь сечения образца, м²;

ρ_0 – плотность сухого материала кг/м³;

Скорость удаления влаги в частных производных в первом приближении заменяли отношением соответствующих приращений

$$\frac{\partial m}{\partial \tau} = \frac{\Delta m}{\Delta \tau} = \frac{m_n - m_{n+1}}{(\tau_{n+1} - \tau_n)}$$

где m_n – масса образца в некоторый момент времени τ_n ;

m_{n+1} – масса образца по прошествии времени τ_{n+1} .

Градиент влагосодержания по толщине образца выражали как

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\Delta U}{\Delta x} = \frac{U_{\text{ц}} - U_{\text{п}}}{R},$$

где ΔU – приращение влагосодержания, кг с.в./ (кг вл.);

Δx – приращение по толщине образца, м;

R – полутолщина образца, м;

$U_{\text{п}}$ – влагосодержание на поверхности образца, кг с.в./ (кг вл.);

$U_{\text{ц}}$ – влагосодержание в центральной плоскости образца.

Плотность сухого материала рассчитывали по формуле

$$\rho_0 = \frac{\rho (100 - \omega_0^{\circ})}{100},$$

где ρ – плотность материала до высушивания, кг/м³;

ω_0° – начальная влажность материала на общую массу, %.

Коэффициент термодиффузии влажного материала a_{mQ} (м²/ (с·К)) определяли экспериментальным путем и рассчитывали по формуле

$$a_{mQ} = a_m \cdot \delta.$$

Относительный коэффициент термодиффузии определяли по формуле

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{U_{\text{ц}} - U_{\text{п}}}{T_{\text{п}} - T_{\text{ц}}},$$

где ΔT – приращение температуры, К;

$T_{\text{ц}}$ и $T_{\text{п}}$ – температура в центральной плоскости образца и на ее поверхности соответственно, К.

Для определения влагосодержания $U_{\text{ц}}$ и температуры $T_{\text{ц}}$ строили соответствующие касательные к поверхности.

Влагосодержание $U_{\text{ц}}$ и температура $T_{\text{ц}}$ лежат на пересечении центральной плоскости образца и касательной к поверхности в точках $U_{\text{п}}$ и $T_{\text{п}}$ соответственно.

Обобщение зависимостей коэффициента диффузии и термовлагопроводности от влажности рыбы $a_m = f(\omega^{\circ})$ и $a_{m\theta} = f(\omega^{\circ})$ соответственно проводили на основе критериев подобия

$$\frac{a_m}{a_{m_{k1}}} \cdot \frac{a_m}{a_{m_{k2}}} = f\left(\frac{\omega^{\circ}}{\omega_{k1}^{\circ}} \cdot \frac{\omega^{\circ}}{\omega_{k2}^{\circ}}\right) \text{ и } \frac{a_{m\theta}}{a_{m\theta_{k1}}} \cdot \frac{a_{m\theta}}{a_{m\theta_{k2}}} = f\left(\frac{\omega^{\circ}}{\omega_{k1}^{\circ}} \cdot \frac{\omega^{\circ}}{\omega_{k2}^{\circ}}\right). \quad (4)$$

Определив произведение $a_{m_{k1}} \cdot a_{m_{k2}}$ и $a_{m\theta_{k1}} \cdot a_{m\theta_{k2}}$ из (4), представляется возможным находить конкретные зависимости $a_m = f(\omega^{\circ})$ и $a_{m\theta} = f(\omega^{\circ})$

Результаты и их обсуждение

Проведен анализ кривых вида $\omega^{\circ} = f(\tau)$ для процессов копчения и сушки рыбы полугорячим и горячим способами. На рисунке 1 показаны кривые кинетики обезвоживания на примере полугорячей и горячей сушки скумбрии, горбуши, зубатки, пикши и трески.

Исследовали характер распределения температуры и влажности по толщине рыбы в режимах полугорячей и горячей сушки. На рисунках 2 и 3 приведены кривые распределения влажности и температуры по слоям на примере полугорячей сушки скумбрии (тушка-кусок) и трески (филе-кусок). Анализируя графики видно, что рыбное сырье с меньшим содержанием влаги (рисунок 2) имеет более высокий темп нагрева, чем сырье более обводненное (рисунок 3). Меньшему начальному содержанию влаги соответствует и меньшая теплоемкость, в результате при равных температурах процесс нагрева рыбы протекает быстрее.

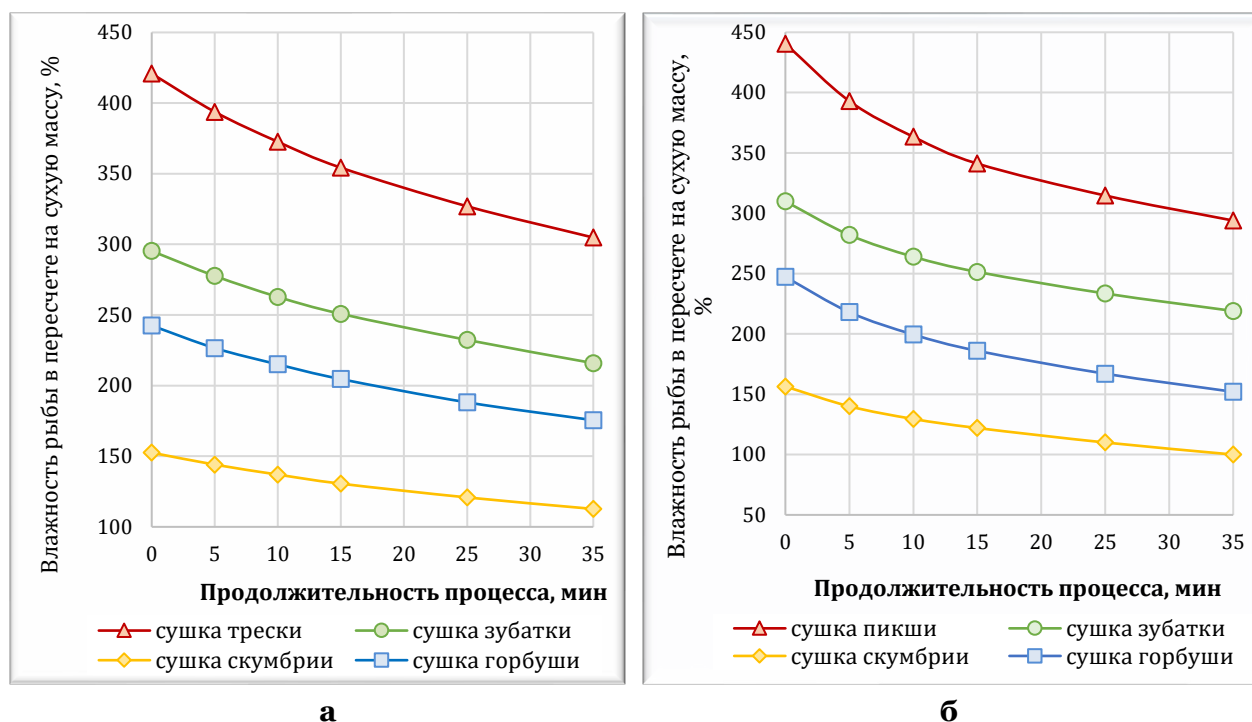


Рисунок 1 – Зависимость влажности рыбы от продолжительности процесса полугорячей (а) и горячей (б) сушки
Figure 1. Dependence of the change in fish moisture content on the process duration: semi-hot (a); hot (б)

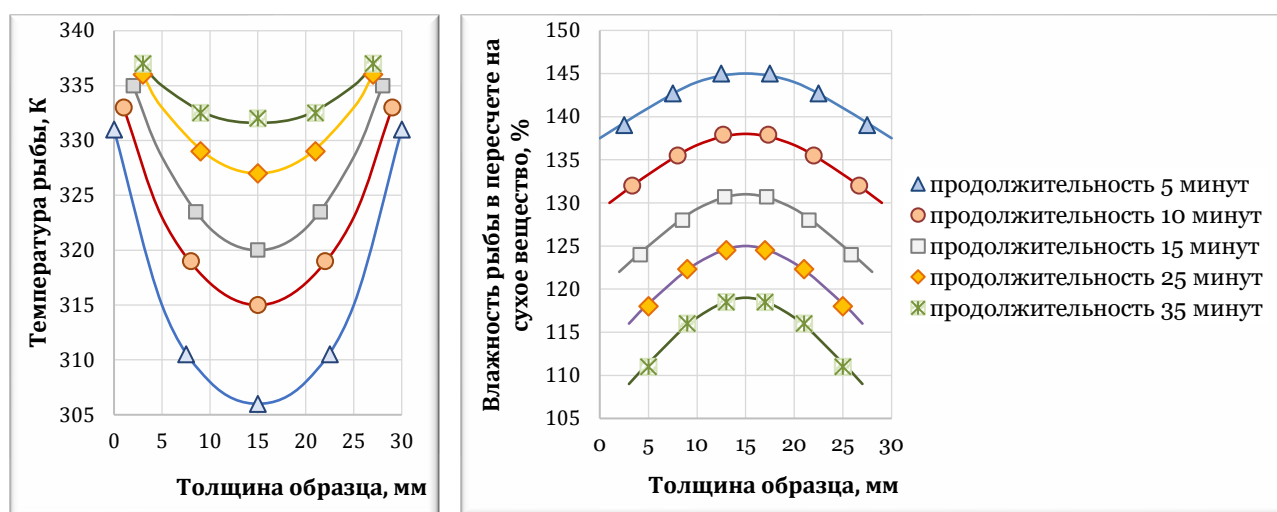


Рисунок 2 – Распределение температуры и влажности по толщине скумбрии в процессе полугорячей сушки
Figure 2. Temperature and moisture distribution across the mackerel thickness at semi-hot drying

Проведен анализ температурных кривых вида $T = f(\tau)$ при различных режимах копчения и сушки рыбы полугорячим и горячим способами с целью исследования углубления зоны испарения. На рисунке 4 приведены температурные кривые на примере полугорячей сушки скумбрии, горбуши, зубатки и трески. Анализируя графики видно, что в процессе нагрева рыбы характерным является достижение критической температуры в поверхностном слое, после которой темп нагрева снижается.

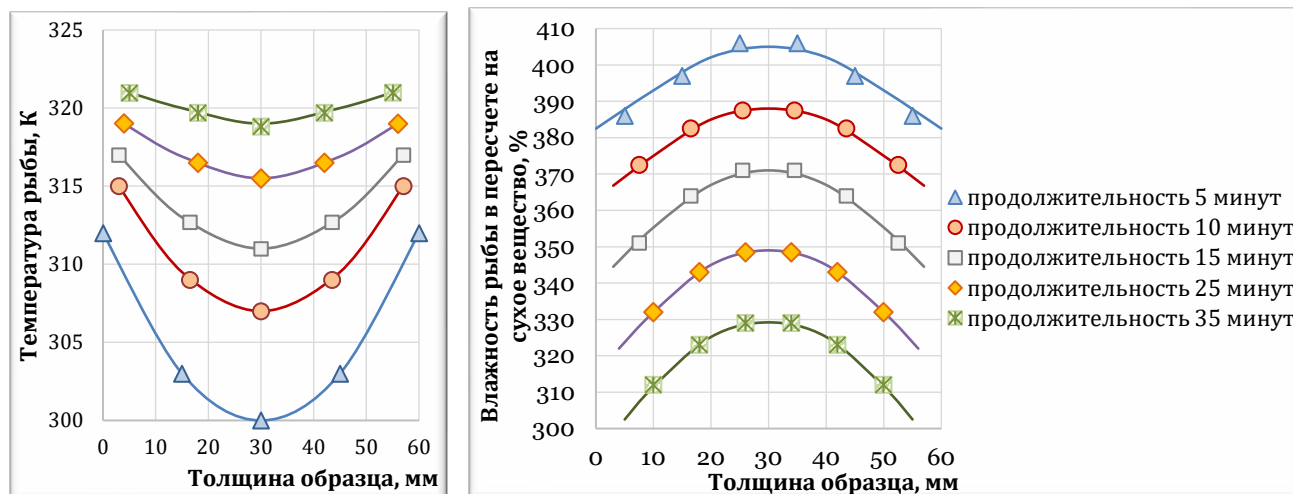


Рисунок 3 – Распределение температуры и влажности по толщине трески в процессе полугорячей сушки
Figure 3. Temperature and moisture distribution across the cod thickness at semi-hot drying

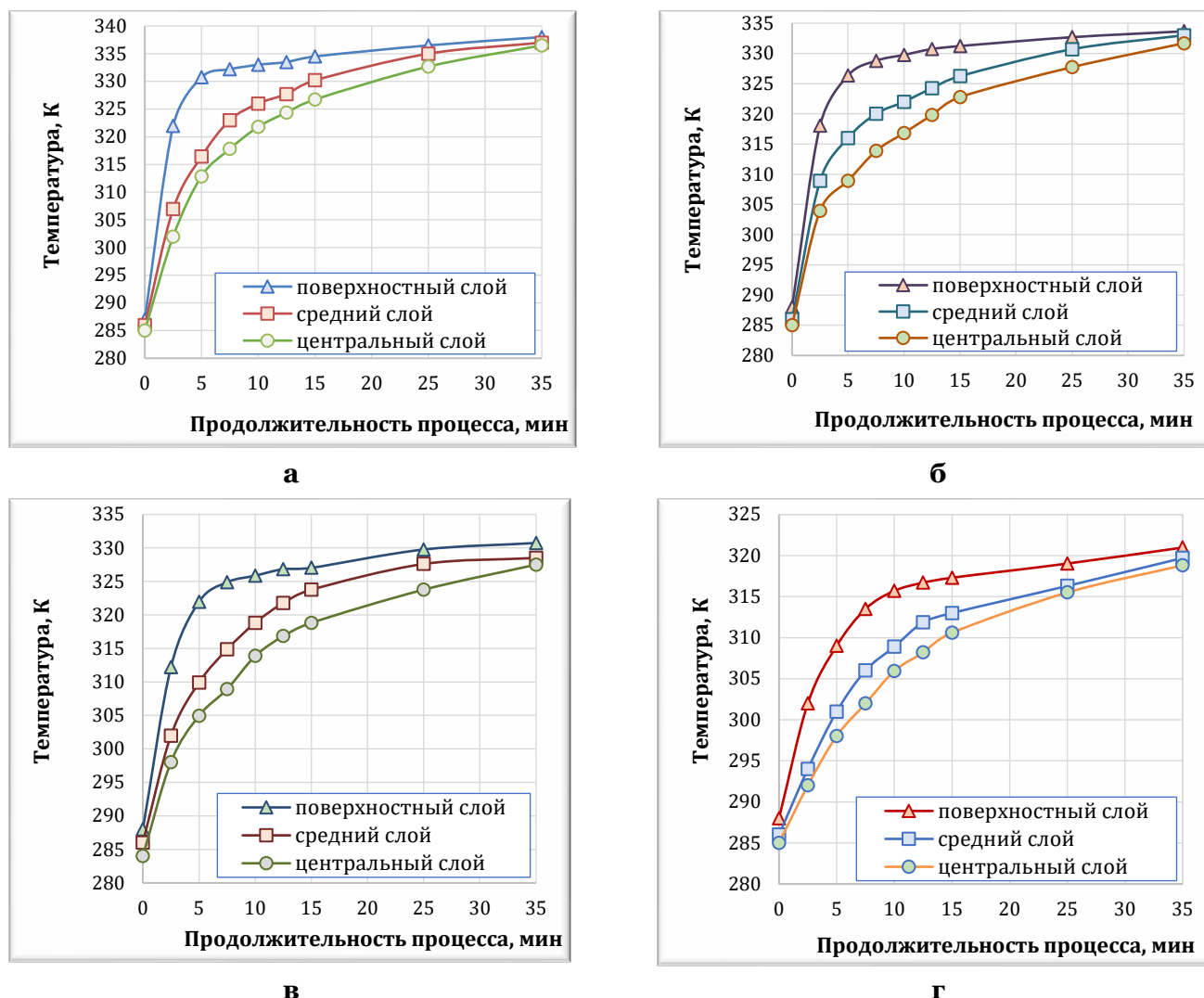


Рисунок 4. Зависимость температуры по слоям рыбы от продолжительности процесса полугорячей сушки: а – скумбрии; б – горбуши; в – зубатки; г – трески
Figure 4. Dependence of temperature changes in fish layers on the durability of semi-hot drying of: а – mackerel; б – pink salmon; в – wolffish; г – cod

Увеличение градиента влажности (рисунок 5а) в процессе полугорячей сушки сопровождается снижением градиента температуры на поверхности рыбы (рисунок 5б). При этом градиенты влажности на поверхности рыбы с высоким содержанием жира существенно ниже, чем у рыбы тощей.

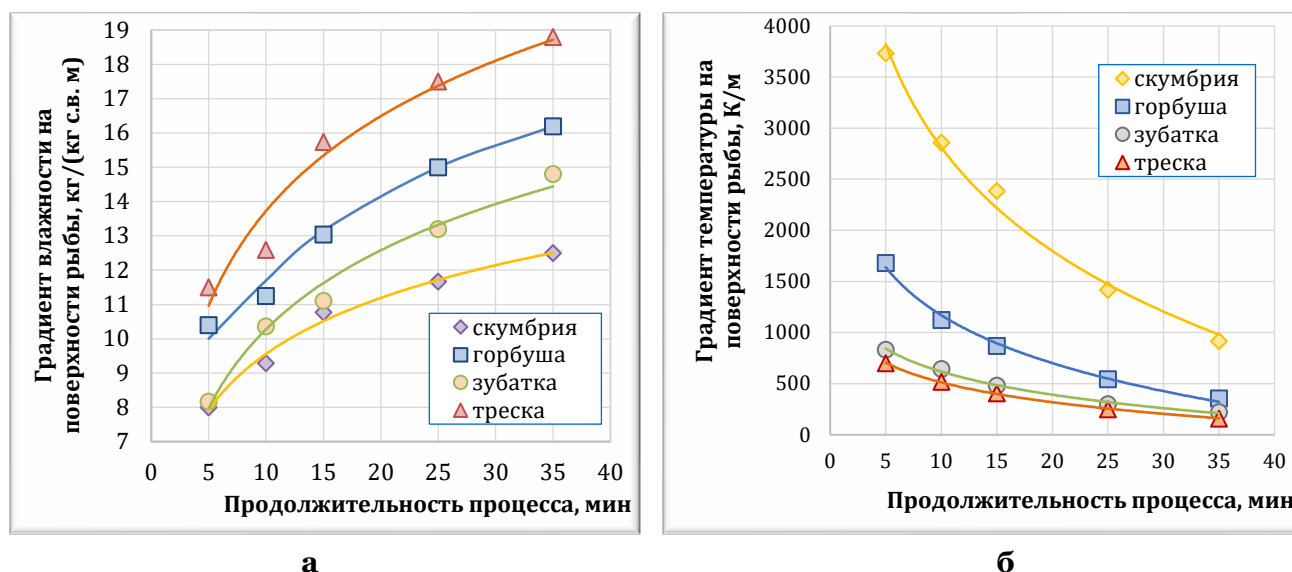


Рисунок 5 – Зависимость градиентов влажности (а) и градиентов температуры (б) на поверхности рыбы от продолжительности полугорячей сушки

Figure 5. Dependence of fish surface moisture (a) and temperature (б) gradients changes on the semi-hot drying duration

На основе полученных данных исследовано изменение диффузионных свойств рыбы в процессах полугорячей и горячей сушки (рисунок 6) с определением коэффициентов диффузии и термодиффузии в рыбе при ее обезвоживании и нагреве, проанализирована динамика их изменения.

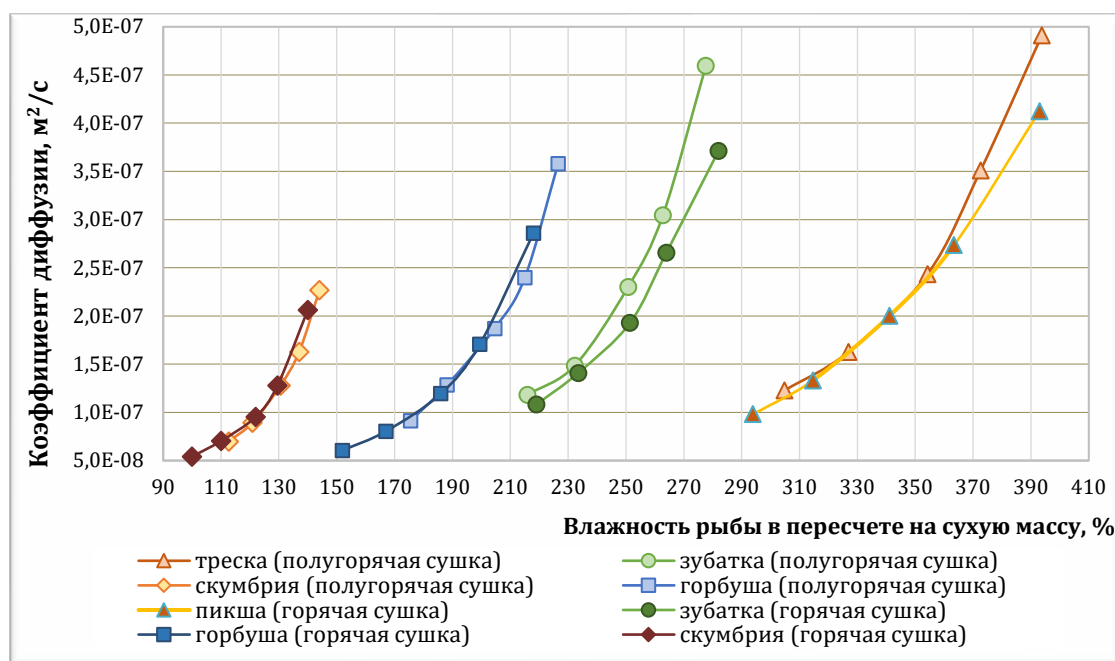
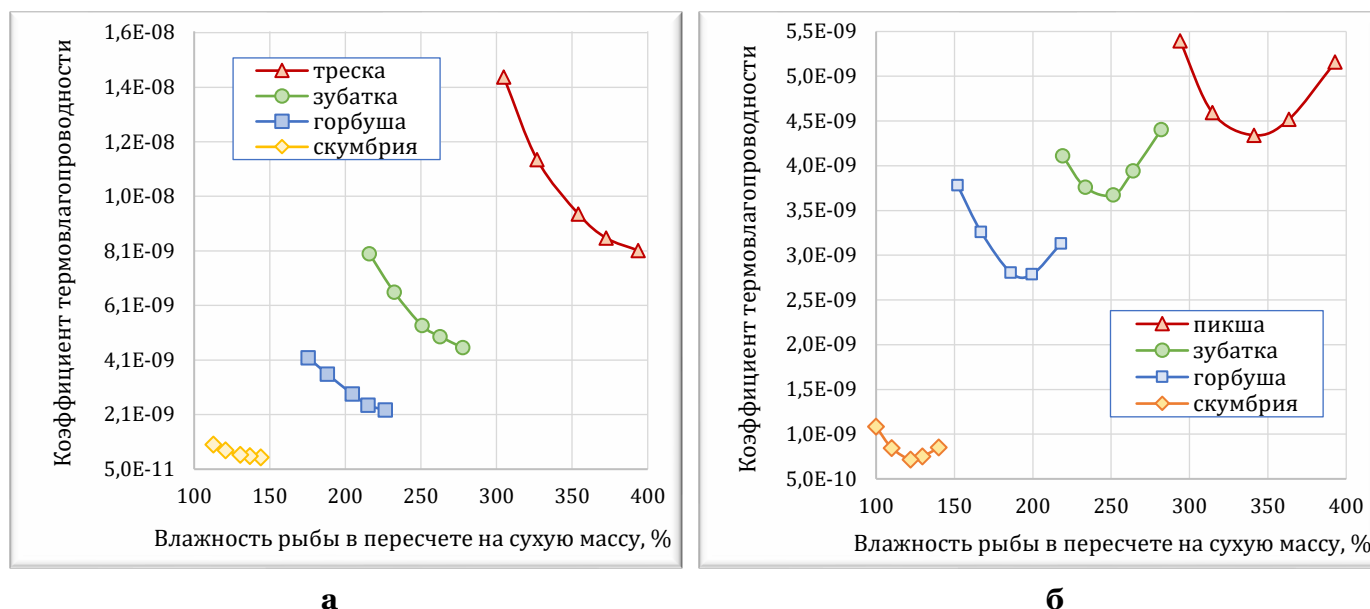


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента диффузии от влажности рыбы в процессе полугорячей и горячей сушки

Figure 6. Dependence of diffusion coefficients on fish moisture content at semi-hot and hot drying

Коэффициент диффузии влаги во второй период обезвоживания при снижении влагосодержания в процессе тепловой обработки рыбного сырья непрерывно уменьшается (рисунок 6). В режиме полугорячей сушки коэффициент диффузии рыб достигает более высоких значений, чем в режиме горячей сушки, что связано с меньшей усадкой капилляров и, соответственно, лучшими влагонепроводными свойствами при обработке в щадящих режимах.

Способность материала к переносу влаги под влиянием разности температур, совпадающей с направлением теплового потока, называется термовлагопроводностью. Следовательно, при конвективной сушке возникает температурный градиент, направленный в противоположную сторону от градиента влажности между поверхностью и внутренними слоями материала, что затрудняет перемещение влаги из глубины к его поверхности. Особый интерес вызвало изучение изменения термовлагопроводности рыбы во времени. Исследованы закономерности изменения коэффициентов термодиффузии рыбы в процессах полугорячей и горячей сушки (рисунок 7).



а

б

Рисунок 7. Зависимость коэффициента термодиффузии от влажности рыбы в процессе полугорячей (а) и горячей (б) сушки

Figure 7. Dependence of thermal diffusion coefficient on fish moisture content at semi-hot (a) drying and hot (б) drying

Коэффициент термодиффузии в процессе полугорячей сушки при уменьшении влагосодержания рыбы непрерывно увеличивается (рисунок 7а). В процессе горячей сушки изменения протекают иначе (рисунок 7б) и с меньшими числовыми значениями: в первый период обезвоживания коэффициент термодиффузии уменьшается, а для второго периода сушки характерен интенсивный рост.

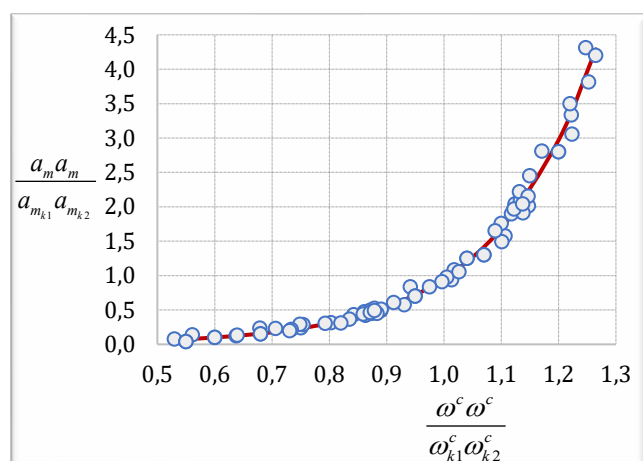


Рисунок 8 – Обобщенная зависимость критериев диффузионного подобия от безразмерной степени обезвоживания рыбы в процессах сушки и копчения полугорячим и горячим способами

Figure 8. Generalized dependence of diffusion similarity criteria on the dimensionless degree of fish dehydration at its semi-hot and hot drying and smoking

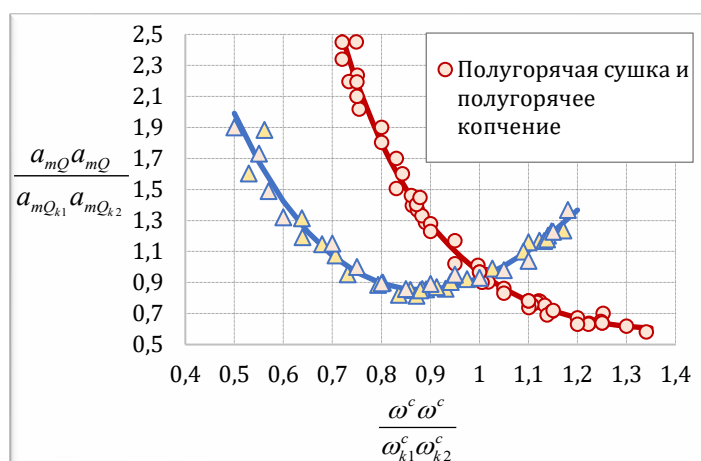


Рисунок 9 – Обобщенная зависимость критериев термодиффузионного подобия от безразмерной степени обезвоживания рыбы в процессах сушки и копчения полугорячим и горячим способами

Figure 9. Generalized dependence of thermal diffusion similarity criteria on the dimensionless degree of fish dehydration at its semi-hot and hot drying and smoking

Множество экспериментальных зависимостей вида $a_m = f(\omega)$ и $a_{mQ} = f(\omega)$ для процессов сушки и копчения рыбы полуторачим и горячим способами удалось привести к обобщенным зависимостям в безразмерных координатах (рисунки 8 и 9).

Предложены математические описания обобщенной диффузионной зависимости и обобщенных термодиффузионных зависимостей:

➤ для полуторачего и горячего способов сушки и копчения

$$\frac{a_m a_m}{a_{mk1} a_{mk2}} = 3,35 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(5,656 \cdot \frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c}\right); \quad (5)$$

➤ для полуторачего способа сушки и копчения

$$\frac{a_{mQ} a_{mQ}}{a_{mQk1} a_{mQk2}} = \exp\left(5,664 - 8,929 \frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c} + 3,232 \left(\frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c}\right)^2\right); \quad (6)$$

➤ для горячего способа сушки и копчения

$$\frac{a_{mQ} a_{mQ}}{a_{mQk1} a_{mQk2}} = 14,9 + 15,74 \frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c} - 29,7 \left(\frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c}\right)^{0,5}, \quad (7)$$

где a_m , a_{mk1} , a_{mk2} и a_{mQ} , a_{mQk1} , a_{mQk2} – коэффициенты диффузии и термодиффузии влаги, соответствующие текущей ω^c , первой ω_{k1}^c и второй ω_{k2}^c критической влажности.

Коэффициенты a_m и a_{mQ} соответственно определяются на основе (5)–(7):

$$a_m = \left\{ a_{mk1} a_{mk2} \cdot 3,35 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(5,656 \cdot \frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c}\right) \right\}^{0,5}; \quad (8)$$

$$a_{mQ} = \left(a_{mQk1} a_{mQk2} \cdot \exp\left(5,664 - 8,929 \frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c} + 3,232 \left(\frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c}\right)^2\right) \right)^{0,5}; \quad (9)$$

$$a_{mQ} = \left\{ a_{mQk1} a_{mQk2} \cdot \left[14,9 + 15,74 \cdot \left(\frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c}\right) - 29,7 \cdot \left(\frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c}\right)^{0,5} \right] \right\}^{0,5}. \quad (10)$$

Произведения $a_{mk1} \cdot a_{mk2}$ и $a_{mQk1} \cdot a_{mQk2}$ выражаем из уравнений (8)–(10):

$$a_{mk1} a_{mk2} = \frac{a_m^2}{\left[3,35 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(5,656 \cdot \frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c}\right) \right]}; \quad (11)$$

$$a_{mQk1} a_{mQk2} = \frac{a_{mQ}^2}{\exp\left(5,664 - 8,929 \frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c} + 3,232 \left(\frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c}\right)^2\right)}; \quad (12)$$

$$a_{mQk1} a_{mQk2} = \frac{a_{mQ}^2}{\left[14,9 + 15,74 \cdot \left(\frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c}\right) - 29,7 \cdot \left(\frac{\omega^c \omega^c}{\omega_{k1}^c \omega_{k2}^c}\right)^{0,5} \right]}. \quad (13)$$

Подставляя текущую влажность рыбы ω^c и произведения $a_{mk1} \cdot a_{mk2}$ и $a_{mQk1} \cdot a_{mQk2}$ в выражения (8)–(10), можно определить коэффициенты влагопроводности или термовлагопроводности рыбы расчетным методом. Использование в расчетах формул (11)–(13) включает нахождение опытным путем как минимум одного частного коэффициента влагопроводности или термовлагопроводности.

Значения произведений $a_{mk1} \cdot a_{mk2}$ и $a_{mQk1} \cdot a_{mQk2}$ так же можно определить и расчетным способом, используя зависимости, полученные на основе экспериментальных данных. Анализ зависимостей произведений $\omega_0^2 \cdot a_{mk}$ и $\omega_0^2 \cdot a_{mQk}$ от первой ω_{k1}^c и второй ω_{k2}^c критических влажностей позволил получить расчетные формулы:

✓ для определения произведения $a_{mk1} \cdot a_{mk2}$ в выражении (8)

$$a_{mk1} = \frac{2,870 \cdot 10^{-8}}{\omega_0^{c2}} \cdot (1 + \omega_{k1}^c)^{2,479}; \quad (14)$$

$$a_{mk2} = \frac{1,266 \cdot 10^{-8}}{\omega_0^{c2}} \cdot (1 + \omega_{k2}^c)^{2,556}. \quad (15)$$

✓ для определения $a_{mQk1} \cdot a_{mQk2}$ применительно к выражению (9)

$$a_{mQk1} = \frac{1,921 \cdot 10^{-14}}{\omega_0^{c2}} \cdot (1 + \omega_{k1}^c)^{4,238}; \quad (16)$$

$$a_{mQk2} = \frac{1,554 \cdot 10^{-13}}{\omega_0^{c2}} \cdot (1 + \omega_{k2}^c)^{4,009}. \quad (17)$$

✓ для определения $a_{mQk1} \cdot a_{mQk2}$ применительно к выражению (10)

$$a_{mQk1} = \frac{8,436 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(\frac{-842,96}{\omega_{k1}^c}\right)}{\omega_0^{c2}}; \quad (18)$$

$$a_{mQk2} = \frac{6,981 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(\frac{-731,16}{\omega_{k2}^c}\right)}{\omega_0^{c2}}. \quad (19)$$

Определив произведения $a_{mk1} \cdot a_{mk2}$ и $a_{mQk1} \cdot a_{mQk2}$, открывается возможность построения зависимостей коэффициентов диффузии и термодиффузии от влажности рыбы в процессе тепловой обработки расчетным путем.

Предлагаемый алгоритм определения влагопроводных и термодиффузионных характеристик рыбы включает расчет коэффициентов диффузии и термодиффузии, входящих в уравнение (3). Исходные данные для их расчета: первая и вторая критическая влажность, определяемая по формулам (1) и (2), начальная и текущая влажность рыбы. Коэффициенты диффузии и термодиффузии влаги в рыбе определяются на основе уравнений (8)–(10). Для определения произведения $a_{mk1} \cdot a_{mk2}$ в формуле (11) и $a_{mQk1} \cdot a_{mQk2}$ в формулах (12) и (13) необходимо найти экспериментальным путем хотя бы одно значение коэффициента диффузии или термодиффузии влаги при конкретной влажности рыбы и подставить эти значения в (8), (9) или (10) соответственно. Либо неизвестные значения произведений $a_{mk1} \cdot a_{mk2}$ и $a_{mQk1} \cdot a_{mQk2}$ можно определить расчетным путем на основе формул (14)–(19). Последующее построение и анализ функциональных зависимостей коэффициента диффузии от изменения содержания влаги дает возможность определить характер связи влаги с материалом, наибольшее количество которой удаляется в данный момент времени.

Заключение

Данные исследования позволили разработать критерии диффузионного подобия для процессов обезвоживания и нагревания рыбы при ее обработке копчением и сушкой горячим и полугорячим способами. На основе множества частных зависимостей получены обобщенные зависимости в безразмерных координатах для процессов диффузии и термодиффузии. Эти новые научные результаты могут быть использованы для оценки влагопроводных характеристик объектов при их тепловой обработке, позволяя проектировать оптимальные режимы нагревания и обезвоживания гидробионтов расчетно-аналитическим путем, минимизируя затраты на поисковые работы, и создавать эффективные технологии и техники обработки гидробионтов.

Литература

1. Tzempelikos D.A., Mitrakos D., Vouros A.P., et al. Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. *Journal of Food Engineering*. 2015. V. 156, pp. 10–21. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.01.017
2. Gómez-Pérez L.S., Vega-Galvez A., Moraga N.O. Numerical modeling of conjugate heat and mass transfer with water vaporization in solid materials inside a convective hot air tunnel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2022, V. 135, article 106144. DOI 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106144

3. Kumar C., Joardder M.U.H., Farrell T.W., et al. A porous media transport model for apple drying. *Biosystems Engineering*. 2018, 1 V. 76, pp. 12–25. DOI: 10.1016/j.biosystemseng. 2018.06.021
4. Iskakov I.Zh., Kucherenko V.Ja., Alekseev G.V., et al. Discrete diffusion in multistage mixing of dough with anisotropic internal structure. *E3S Web of Conferences*. 2024, V. 531, article 01007. DOI: 10.1051/e3sconf/202453101007
5. Chayjan R.A., Radmard S.A. Moisture and thermal diffusivity of lentil seed under convective infrared-microwave: Modelling with and without shrinkage. *Res Agr Eng*. 2016, V. 62, Is. 3, pp. 129–140. DOI: 10.17221/24/2014-RAE
6. Роднищев С.В., Дмитриев Д.В., Бакин И.А., Шахов С.В., Глотова И.А., Муравьев А.С. Оптимизация режимов сушки семян киноа в барабанной сушилке с канальной насадкой // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2025. Т. 87. № 2. С. 95–105. DOI: 10.20914/2310-1202-2025-2-95-105
7. Пеленко В.В., Дайнеко К.Э., Иваненко В.П. Учет сил поверхностного натяжения в математической модели тепломассопереноса при осушке поверхностной влаги сухофруктов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 4. С. 23.
8. Арабова З.М., Нугманов А.Х.-Х., Бородулин Д.М., Алексанян И.Ю., Тихонов С.Л., Тихонова Н.В., Осмоловский П.Д. Адаптация математической модели сушки при комбинированном энергоподводе к икорному рыбному сырью на основе кинетики его обезвоживания // Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55, № 3. С. 454–467. DOI: 10.21603/2074-9414-2025-3-2584
9. Antipov S.T., Arapov V.M., Kazartsev D.A. Kinetics laws as the base for mathematical simulation of microwave vacuum drying process. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020, V. 1560, article 012017. DOI: 10.1088/1742-6596/1560/1/012017
10. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Совершенствование математической модели сушки сыров // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2024. № 1. С. 166–171. DOI: 10.24412/2311-6447-2024-1-166-171
11. Яснов А.С., Нугманов А.Х.-Х., Алексанян И.Ю., Осмоловский П.Д., Бакин И.А. Выявление теплофизических характеристик и параметров процесса сушки печени сома в тонком слое // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2024. № 4. С. 110–120.
12. Ершов М.А., Ершов А.М., Лыжин Е.В., Гроховский В.А., Димова Ж.Г. Моделирование процессов обезвоживания провесной и вяленой рыбы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 1. С. 55–61. DOI: 10.20914/2310-1202-2021-1-55-61
13. Pokholchenko V.A., Ershov A.M., Glukhikh Ya.A., Mishanina L.A. Scientific and practical basis of cephalopods dehydration processes. *Vestnik MGTU*. 2024, V. 27, no. 3, pp. 458–470. DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-3-458-470
14. Pohlchenko V., Mishanina L., Ilyin A., Glukhikh Ya. Efficient heat treatment in fish hot smoking technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, V. 1052, no. 1, article 012083. DOI: 10.1088/1755-1315/1052/1/012083.

References

1. Tzempelikos D.A., Mitakos D., Vouros A.P., et al. Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. *Journal of Food Engineering*. 2015. V. 156, pp. 10–21. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.01.017
2. Gómez-Pérez L.S., Vega-Galvez A., Moraga N.O. Numerical modeling of conjugate heat and mass transfer with water vaporization in solid materials inside a convective hot air tunnel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2022, V. 135, article 106144. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106144
3. Kumar C., Joardder M.U.H., Farrell T.W., et al. A porous media transport model for apple drying. *Biosystems Engineering*. 2018, 1 V. 76, pp. 12–25. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.06.021
4. Iskakov I.Zh., Kucherenko V.Ja., Alekseev G.V., et al. Discrete diffusion in multistage mixing of dough with anisotropic internal structure. *E3S Web of Conferences*. 2024, V. 531, article 01007. DOI: 10.1051/e3sconf/202453101007
5. Chayjan R.A., Radmard S.A. Moisture and thermal diffusivity of lentil seed under convective infrared-microwave: Modelling with and without shrinkage. *Res Agr Eng*. 2016, V. 62, Is. 3, pp. 129–140. DOI: 10.17221/24/2014-RAE
6. Rodnishchev S.V., Dmitriev D.V., Bakin I.A., Shakhov S.V., Glotova I.A., Muravyev A.S. Optimizing quinoa seed drying modes in a drum dryer with a channel nozzle. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2025, V. 87, no. 2, pp. 95–105. DOI: 10.20914/2310-1202-2025-2-95-105 (In Russian)
7. Pelenko V.V., Daineko K.E., Ivanenko V.P. The account of forces of a superficial tension in the mathematical model of heat and mass transfer in drying of surface moisture is dried fruits. *Processes and Food Production Equipment*. 2013, no. 4, p. 23. (In Russian)
8. Arabova Z.M., Nugmanov A.Kh.Kh., Borodulin D.M., Aleksanyan I.Yu., Tikhonov S.L., Tikhonova N.V., Osolovskiy P.D. Combined energy supply drying of fish eggs and lecithin clot based on dehydration kinetics: Mathematical model adaptation. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2025, V. 55, no. 3, pp. 454–467. DOI 10.21603/2074-9414-2025-3-2584. (In Russian)
9. Antipov S.T., Arapov V.M., Kazartsev D.A. Kinetics laws as the base for mathematical simulation of microwave vacuum drying process. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020, V. 1560, article 012017. DOI: 10.1088/1742-6596/1560/1/012017

10. Velikanov N.L., Naumov V.A. Improvement of the mathematical model of cheese drying. *Technologies of the Food and Processing Industry of the AIC – Healthy Food*. 2024, no. 1, pp. 166–171. DOI: 10.24412/2311-6447-2024-1-166-171. (In Russian)
11. Yasnov A.S., Nugmanov A.Kh- Kh., Aleksanyan I.Yu., Osmolovskiy P.D., Bakin I.A. Identification of thermophysical characteristics and parameters of the drying process of catfish liver in a thin layer. *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*. 2024, no. 4, pp. 110–120. (In Russian)
12. Ershov M.A., Ershov A.M., Lyzhin E.V., Grohovskiy V.A., Dimova Z.G. Modeling of mass transfer processes during dehydration of air-dried fish. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021, V. 83, no. 1, pp. 55–61. DOI: 10.20914/2310-1202-2021-1-55-61. (In Russian)
13. Pokholchenko V.A., Ershov A.M., Glukhikh Ya.A., Mishanina L.A. Scientific and practical basis of cephalopods dehydration processes. *Vestnik MGTU*. 2024, V. 27, no. 3, pp. 458–470. DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-3-458-470
14. Pohlchenko V., Mishanina L., Ilyin A., Glukhikh Ya. Efficient heat treatment in fish hot smoking technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, V. 1052, no. 1, article 012083. DOI: 10.1088/1755-1315/1052/1/012083.

Информация об авторах

Вячеслав Александрович Похольченко – канд. техн. наук, доцент, завкафедрой Технологического и холодильного оборудования
Александр Михайлович Ершов – д-р техн. наук, профессор
Валерий Викторович Пеленко – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры Теплосиловых установок и тепловых двигателей
Людмила Александровна Мишанина – канд. биол. наук, доцент, директор медико-биологического института

Information about the authors

Vyacheslav A. Pokholchenko, PhD (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Technological and Refrigeration Equipment
Alexander M. Ershov, DSc (Eng), Professor
Valery V. Pelenko, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Thermal Power Plants and Thermal Engines
Ludmila A. Mishanina, PhD (Biol), Associate Professor, Director of the Medical and Biological Institute

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 18.04.2026
Одобрена после рецензирования 21.05.2026
Принята к публикации 25.05.2026

The article was submitted 18.04.2026
Approved after reviewing 21.05.2026
Accepted for publication 25.05.2026