

Научная статья

УДК 664.8/.9+ 66-93

DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-44-55

Моделирование процессов тепловой обработки головоногих моллюсков

В.А. Похольченко*, А.М. Ершов, Л.А. Мишанина

*Мурманский Арктический Университет
Россия, Мурманск, *PokholchenkoVA@mstu.edu.ru*

Аннотация. Изучали закономерности кинетики процессов обезвоживания кальмаров и осьминогов как отдельной группы капиллярно-пористых коллоидных тел с использованием промышленных способов энергоподвода. Исследования включали анализ влияния видового, размерно-массового состава материала и режимных параметров в процессе удаления влаги из продукта. Использовалась методика нахождения критических точек, соответствующих достижению критической влажности материала в данный период времени. Установлено, что у головоногих моллюсков удаление влаги с постоянной скоростью протекает существенно дольше в сравнении с рыбным сырьем. Для рыб первая критическая точка достигается в конце периода постоянной скорости обезвоживания, в то время как для головоногих моллюсков имеет место лишь одна критическая точка в течение всего процесса удаления влаги. Предложена математическая модель для нахождения критической влажности в процессе обезвоживания головоногих моллюсков. Разработаны числа подобия с целью сведения множества кривых обезвоживания головоногих моллюсков разного состава и геометрических размеров в условиях различных способов и жесткости тепловой обработки в одну обобщенную зависимость. Полученные закономерности обеспечивают пути проектирования и оптимизации теплообменных процессов и аппаратов в пищевой инженерии.

Ключевые слова: тепловая обработка; головоногие моллюски; процесс обезвоживания; критическая влажность; обобщенная кривая; подобие процессов

Original article

Modeling of cephalopods heat treatment processes

Vyacheslav A. Pokholchenko*, Alexander M. Ershov, Ludmila A. Mishanina

*Murmansk Arctic University
Murmansk, Russia, *PokholchenkoVA@mstu.edu.ru*

Abstract. The dehydration processes kinetics laws of squid and octopus, as a separate capillary-porous colloidal bodies group, were studied using industrial methods of energy supply. The research included an analysis of the influence of the species and size-mass composition of the material as well as operating conditions in the process of removing moisture from the product. The method was used to find critical points corresponding to a certain level of humidity in a specific period of time. It was found that cephalopods constant rate moisture removal is significantly longer compared to fish raw materials. For fish, the first critical point is reached at the end of a period of constant dehydration rate; for cephalopods, there is only one critical point during the entire moisture removal process. A mathematical model is proposed for finding critical humidity in the process of dehydration of cephalopods. The authors of the study developed similarity numbers in order to reduce the set of dehydration curves of cephalopods of different composition and geometric sizes under conditions of various methods and rigidity of heat treatment into one generalized dependence. The obtained patterns provide some ways to design and optimize heat and mass transfer processes and devices in food engineering.

Keywords: heat treatment; cephalopods; dehydration process; critical moisture; generalized curve; process similarity

Введение

Тепловая обработка пищевого сырья обезвоживанием представляется достаточно энергозатратной технологической операцией, при этом составляет основу многих перерабатывающих линий. В современных условиях востребованы процессы и технологии с минимальными затратами энергии и ресурсов. Это обеспечивает снижение себестоимости готовой продукции и повышает эффективность применения технологического оборудования. Разработка таких процессов и технологий представляется возможной на основе знаний закономерностей их протекания и получения обобщенных зависимостей.

Значительный вклад в разработку и развитие приближенных методик расчета процессов обезвоживания на основе общих закономерностей их протекания был сделан еще в прошлом веке

известными исследователями А.В. Лыковым, А.С. Гинзбургом и другими [1, 2]. Их работы базируются на применении теории подобия, показывающей подобие явлений с соотношением взаимодействующих факторов, характеризующихся схожими величинами критериев подобия. Процессы характеризуются уравнениями подобия с рядом безразмерных критериев в установленных соотношениях между собой. Найденную зависимость с рядом определенных критериев подобия в подобных явлениях можно считать математической моделью процесса.

Создание оптимальных режимов обезвоживания рыбы и других пищевых продуктов в тепловых процессах в основном опирается на закономерности, проявляющие себя при сушке капиллярно-пористых коллоидных тел [1, 2].

Достаточно работ посвящено изучению процессов обезвоживания рыбных продуктов, в которых описаны различные методы обобщения кривых кинетики обезвоживания [3–6].

В публикациях [1, 7, 8–11] предложены методы расчета кинетики обезвоживания рыбного сырья, основанные на общих закономерностях процессов. Установлена четкая взаимосвязь между критическими влажностями на кривых кинетики обезвоживания с химическим составом рыбы [7]. Вторая критическая точка на кривой кинетики обезвоживания возникает при удалении микрокапиллярной влаги.

Авторами ранее предложены на базе безразмерных критериев подобия математические модели кинетики обезвоживания рыбного сырья при воздействии теплового агента в диапазоне температур от 40 до 180°C в процессах полугорячей, горячей сушки, сушки и обжаривания [12, 13].

Однако для нерыбных объектов промысла, таких как головоногие моллюски, в научной литературе недостаточно сведений. Они представлены в основном лишь частными зависимостями, а предложенные методы имеют ограниченное применение и не способствуют выявлению общих закономерностей тепломассопереноса в данном сырье при различных режимах и способах энергоподвода [14–20].

По данным информационно-аналитического отдела Fishretail.ru и базы данных ведущей аналитической компании на рынке маркетинговых исследований Tebiz Group при обзоре мирового рынка морепродуктов, в настоящее время сократилось поступление головоногих моллюсков на береговые предприятия в связи с ограничениями по их промыслу для основных стран-производителей. Усиление охраны истощающихся запасов и преждевременные закрытия сезонов вылова способствуют росту цен на такие ценные в питании морепродукты, как кальмары и осьминоги. Кроме того, снижение поставок также обусловлено нестабильной эпидемиологической обстановкой и сокращением трудовых ресурсов на добывающих объектах, поэтому в сложившихся условиях необходима глубокая переработка сырья, основанная на использовании научно-практических основ процессов тепловой обработки головоногих моллюсков с применением энерго- и ресурсосберегающих режимов.

Целью данного исследования является разработка обобщенной модели процесса обезвоживания головоногих моллюсков, позволяющей проектировать оптимальные режимы их тепловой обработки. Для ее достижения решали следующие задачи:

- ✓ исследовали характер протекания процессов обезвоживания головоногих моллюсков при различных способах энергоподвода и режимах тепловой обработки;
- ✓ устанавливали наличие и количество критических точек, характеризующих изменение форм связи влаги с материалом, на кривых обезвоживания головоногих моллюсков;
- ✓ анализировали характер обезвоживания головоногих моллюсков и оценивали возможность применения ранее полученных обобщенных зависимостей для рыбного сырья для моделирования процессов тепловой обработки кальмаров и осьминогов;
- ✓ оценивали возможность обобщения кинетических зависимостей обезвоживания головоногих моллюсков при различных способах и режимах тепловой обработки;
- ✓ определяли номенклатуру критериев в обобщенной математической модели для различных способов тепловой обработки головоногих моллюсков.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов тепловой обработки использовали мороженое сырье – кальмар командорский *Berryteuthis magister* (район промысла Северо-Западная часть Тихого океана, Дальневосточный бассейн), кальмар аргентинский *Illex argentes* (Юго-Западная Атлантика), осьминог обыкновенный

Octopus vulgaris (производство республики Вьетнам) с предельным сроком хранения не более трех месяцев при температуре не выше минус 18°C. Данные виды являются основными объектами водного промысла головоногих моллюсков и хорошим сырьем для производства продукции копченой, сушеной, бланшированной и консервов в масле с предварительной тепловой обработкой из соответствующего полуфабриката.

Экспериментальная часть работы выполнена на базе учебно-экспериментального цеха и научно-исследовательских лабораторий Мурманского арктического университета.

Кинетические зависимости изучали с учетом влияния каждого из определяющих факторов на характер процесса в отдельности. Опыты группировали в серии, в каждой из них исследуемый фактор, воздействующий на процесс, меняли в заданных пределах, остальные факторы сохраняли постоянными во времени. Например, учитывая влияние разных размерно-массовых характеристик сырья – удельной поверхности S/m (м²/кг) – постоянными оставались остальные параметры, влияющие на процесс: начальная влажность сырья ω (%), характеризующая видовой и химический состав; тепло-влажностные и аэродинамические характеристики в камере – температура T (К), относительная влажность ϕ (%) и скорость циркуляции v (м/с) сушильного агента; температура растительного масла T_m (К); мощность инфракрасных излучателей W (кВт). В последующей серии опытов удельную поверхность сохраняли постоянной, учитывая влияние начальной влажности сырья на характер процесса обезвоживания. Аналогично исследовали влияние режимных параметров на процесс при постоянстве размерно-массовых характеристик и начальной влажности пищевого материала.

Для расчета удельной поверхности у исследуемых экземпляров головоногих моллюсков определялась площадь поверхности на миллиметровой бумаге и соответствующая ей масса.

Начальную, конечную и промежуточные значения влажности объектов сушки в процессе обезвоживания определяли в сушильном шкафу арбитражным методом высушиванием при 105°C. Через установленные промежутки времени фиксировали потери влаги пищевым материалом.

Потери массы x^n (%) через заданные промежутки времени определяли по формуле

$$x^n = \frac{m_{\text{нач}} - m_{\text{кон}}}{m_{\text{нач}}} \cdot 100,$$

где $m_{\text{нач}}$ и $m_{\text{кон}}$ – массы образцов в начале и в конце периода обезвоживания соответственно, кг.

Текущую влажность для каждого промежутка обезвоживания $\omega_{\text{кон}}$ (%) определяли по формуле

$$\omega_{\text{кон}} = \frac{\omega_{\text{нач}} - x^n}{1 - \frac{x^n}{100}},$$

где $\omega_{\text{нач}}$ – влажность образца в начале периода обезвоживания, %.

Полученные значения влажности на общий вес рыбы ω^0 (%) переводили в соответствующие значения абсолютно сухого материала ω^c , %, по формуле

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

Далее в работе все влажности материала приводятся в пересчете на абсолютно сухое вещество.

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

Изучение закономерностей кинетики процессов обезвоживания головоногих моллюсков проводили на созданной и адаптированной авторами промышленной универсальной установке получения сушеных, копченых гидробионтов в широких температурных диапазонах (рисунок 1): 1 – корпус; 2 – отсеки; 3 – двери загрузки и выгрузки вагонеток; 4 – вагонетка; 5 – направляющие; 6 – перегородка отсека; 7 – основной блок тэнов; 8 – канал движения сушильного агента; 9 – промежуточный блок тэнов; 10 – камера смешения; 11 – рециркуляционный вентилятор; 12 – вытяжной вентилятор; 13 – дымогенератор; 14 – блок управления; ГК1, ГК2, ГК3, ГК4 – газоздушные клапаны

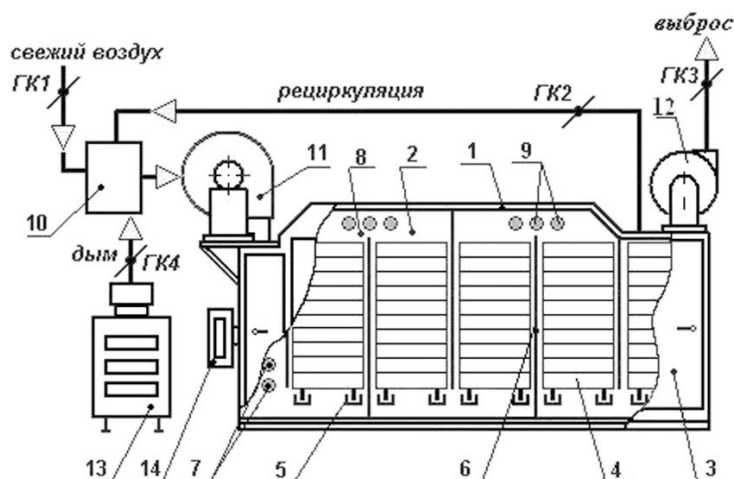


Рисунок 1. Универсальная установка для сушки и копчения продуктов с системой автоматического управления
 Figure 1. Universal unit for drying and smoking products with automatic control system

Ряд экспериментов проводили на лабораторной установке, адаптированной для комбинированного процесса бланширования и сушки продуктов: 1 – блок обработки бланшированием; 2 – камера обезвоживания сушкой; 3 – сетки с объектами обработки; 4 – генератор дыма; 5 – блок смешивания тепловых агентов; 6 – контроллер (рисунок 2).

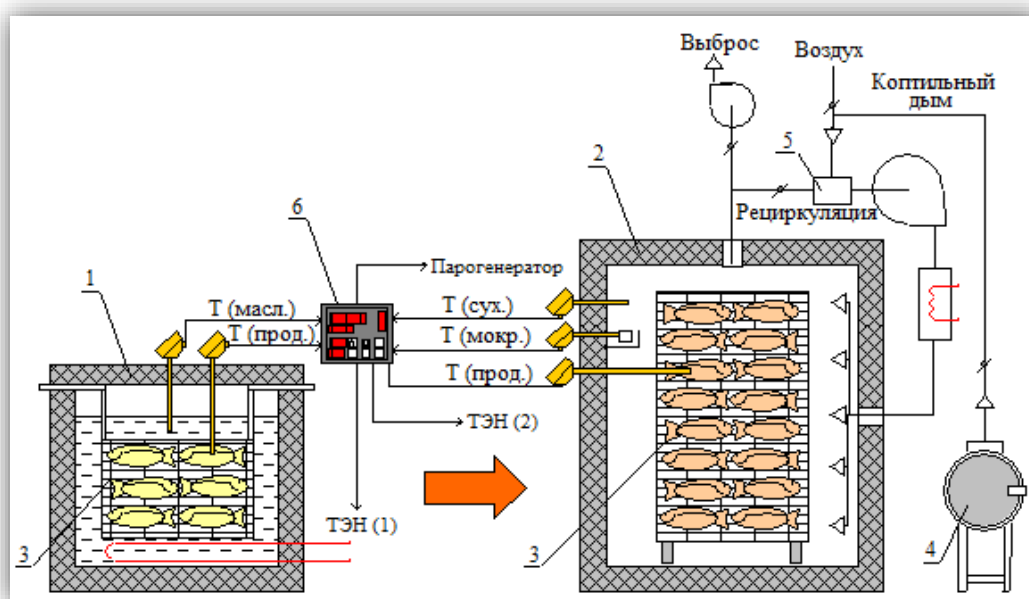


Рисунок 2. Экспериментальная установка для бланширования и сушки продуктов
 Figure 2. Experimental installation for blanching and drying products

Инфракрасную сушку шинкованного аргентинского кальмара с начальной влажностью на общую массу 74,0%, средней исходной массой экземпляров мантии $0,25 \pm 0,01$ кг, длиной мантии $0,21 \pm 0,01$ м проводили на сетках с удельной нагрузкой на сетке от 2,7 до 6,0 кг/м² при температуре от 90 до 110 ± 1 °C.

Процесс бланширования осьминогов с начальной влажностью на общую массу 81,6%, удельной поверхностью от 0,26 до 0,33 м²/кг выполняли в подогретом до температуры 120 ± 2 °C растительном масле.

Обезвоживание тушек командорского кальмара с начальной влажностью на общую массу 79,5%, удельной поверхностью от 0,18 до 0,23 м²/кг осуществляли методом конвективной обработки воздушной полугорячей сушкой при температуре сушильного агента от 65 до 80 ± 1 °C, относительной влажности воздуха 40 ± 2 % и скорости его циркуляции $4,0 \pm 0,5$ м/с.

В исследованиях применялась методика нахождения критических точек, соответствующих

достижению в определенный период времени τ_{ki} критической влажности ω_{ki} . Методика включает построение кривых кинетики обезвоживания в полупологарифмических координатах, представляющих собой ломанные линии из кривой и двух или реже трех прямых линий [7, 13].

При математическом моделировании процессов тепловой обработки головоногих моллюсков использовали методы теории подобия с применением программы обработки данных Datafit 9.1.3 для выявления подобия явлений обезвоживания на основе определения безразмерных критериев-симплексов вида [12]

$$\frac{\tau_1}{\tau_{(k1)1}} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_{(k2)1}} = \frac{\tau_n}{\tau_{(k1)n}} \cdot \frac{\tau_n}{\tau_{(k2)n}} = \dots = \text{const}, \quad \frac{\omega}{\omega_{k1}} \cdot \frac{\omega}{\omega_{k2}} = f\left(\frac{\tau}{\tau_{k1}} \cdot \frac{\tau}{\tau_{k2}}\right), \quad \frac{\omega_i}{\omega_{ki}} = f\left(\frac{\tau_i}{\tau_{ki}}\right).$$

Результаты и их обсуждение

Исследована кинетика процессов обезвоживания нерыбных объектов промысла – головоногих моллюсков на примере кальмаров и осьминогов при различных режимах и способах тепловой обработки.

Известно, что процесс обезвоживания пищевых материалов сопровождается переходами от влаги с меньшей энергией связи к таковой с 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 [2, 7, 12, 13]. Например, при обезвоживании рыбного сырья установлено наличие двух критических влажностей независимо от характера теплового воздействия на объект обработки. Для определения критических влажностей ω_{k1} и ω_{k2} при обезвоживании рыбы можно использовать следующие уравнения [7]:

$$\omega_{k1} = 1,069\omega_0^{0,969}, \tag{1}$$

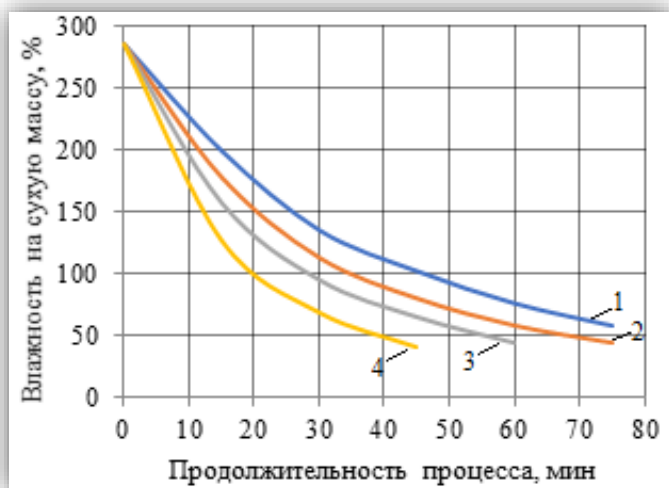
$$\omega_{k2} = 0,784\omega_0 + 2, \tag{2}$$

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

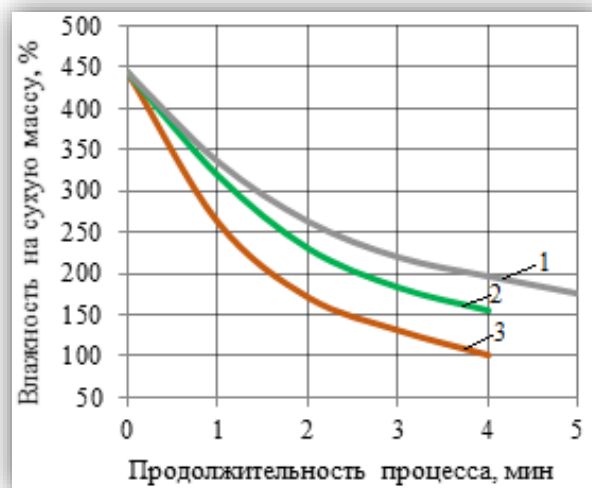
Как видно из выражений (1) и (2), критические влажности при обезвоживании рыбного сырья в общем случае зависят лишь от начального его влагосодержания.

На рисунке 3 представлены серии исследования кинетических зависимостей процессов обезвоживания аргентинского кальмара (обработка методом инфракрасной сушки на сетках конвейера, рисунок 3а), молодого осьминога (бланширование в растительном масле, рисунок 3б), а также командорского кальмара (конвективная обработка полугорячей сушкой, рисунок 3в).

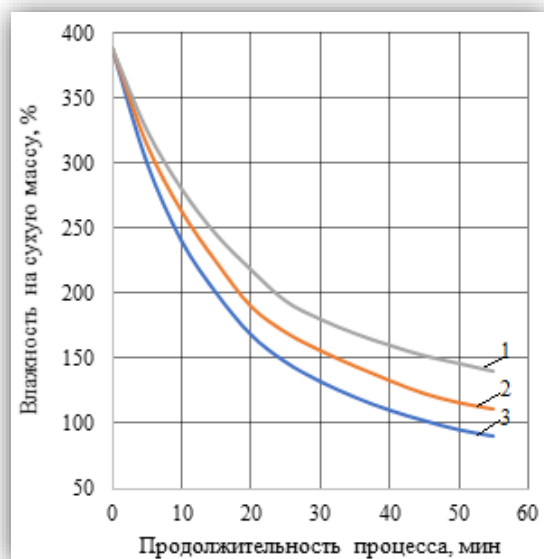
Из кривых кинетики обезвоживания головоногих моллюсков видно, что независимо от метода теплового воздействия на обрабатываемый материал, характер протекания процессов идентичен. При этом темп обезвоживания возрастает при уменьшении удельной нагрузки на носителях, либо увеличении удельной поверхности объектов обработки.



а



б



а – инфракрасная сушка шинкованного кальмара аргентинского: начальная влажность на сухую массу 284,6%, мощность излучателей 0,6 кВт, температура сушки $90 \pm 1^\circ\text{C}$, удельная нагрузка продукта на носитель: 1 – 6,0; 2 – 4,7; 3 – 4,0; 4 – 2,7 кг/м²;

б – бланширование в растительном масле осьминога: начальная влажность на сухую массу 443,5%, температура растительного масла $120 \pm 2^\circ\text{C}$, удельная поверхность тушек: 1 – 0,26; 2 – 0,30; 3 – $0,36 \pm 0,01$ м²/кг;

в – конвективная полутораячая сушка кальмара командорского: начальная влажность на сухую массу 387,8%, температура воздуха $69 \pm 1^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха $40 \pm 2\%$ и скорость циркуляции $4,0 \pm 0,5$ м/с, удельная поверхность тушек: 1 – 0,18; 2 – 0,21; 3 – $0,23 \pm 0,01$ м²/кг

В

Рисунок 3. Кривые обезвоживания головоногих моллюсков при различных режимах тепловой обработки

Figure 3. Dehydration curves of cephalopods under different heat treatment regimes

Головоногие моллюски после обезвоживания при разных способах тепловой обработки (инфракрасная сушка, бланширование в масле, полутораячая конвективная сушка) использовались как готовая снежковая или кулинарная продукция, а также в качестве полуфабриката для консервов (рисунок 4).



Рисунок 4. Обезвоженный полуфабрикат и готовая продукция из головоногих моллюсков

Figure 4. Dehydrated semi-finished products and finished products from cephalopods

На основе кривых кинетики обезвоживания определяли наличие и количество критических точек, возникающих при обезвоживании головоногих моллюсков, как отдельной группы капиллярно-пористых коллоидных тел.

При выявлении критических влажностей кривые кинетики обезвоживания были переведены в полулогарифмические координаты вида $\lg \omega_i = f(\tau_i)$. Графики в данном виде для анализа процесса можно рассматривать как ломаные прямые линии. На рисунке 5 приведен пример кривой кинетики обезвоживания кальмара, построенной в полулогарифмической анаморфозе.

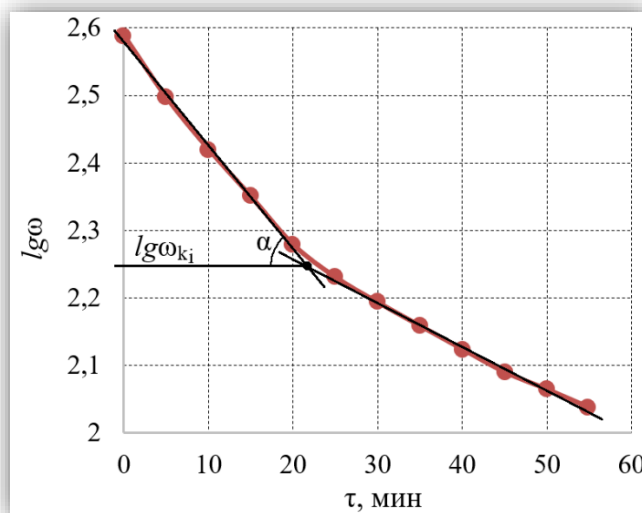


Рисунок 5. Кривая кинетики обезвоживания кальмара в полулогарифмических координатах
 Figure 5. Squid dehydration kinetics curve in semi-logarithmic coordinates

Математическая обработка полулогарифмических зависимостей $lg \omega_i = f(\tau_i)$ позволила определить критические точки для множества кривых обезвоживания головоногих моллюсков. Установлено наличие во всех исследованных случаях лишь одной критической влажности ω_{ki} , для нахождения которой предложена линейная регрессионная зависимость

$$\omega_{ki} = 0,091\omega_0^{1,268}. \quad (3)$$

На следующем этапе исследования требовалось уточнить, можно ли при моделировании тепловых процессов обработки головоногих моллюсков применять закономерности, полученные авторами ранее при исследовании процессов обезвоживания рыбного сырья различными способами [7, 13].

Проанализированы зависимости критических влажностей от начального содержания влаги (рисунок 6) в рыбном сырье и головоногих моллюсках, построенные на основе уравнений (1)–(3).

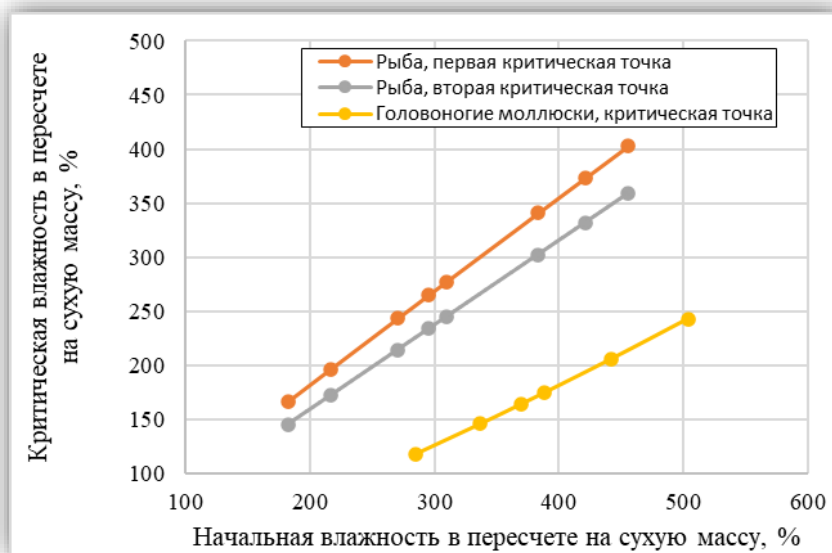


Рисунок 6. Зависимости критических влажностей от начальной влажности гидробионтов
 Figure 6. Critical moisture dependencies on the initial moisture of hydrobionts

Представленные зависимости (рисунок 6) демонстрируют характер взаимосвязи начальной и критической влажностей при обезвоживании рыбного сырья и головоногих моллюсков. Из графиков видно, что у головоногих моллюсков в сравнении с рыбным сырьем обезвоживание протекает несколько иначе и период постоянной скорости обезвоживания существенно дольше. Окончание данного периода

для рыбного сырья соответствует достижению первой критической влажности ω_{k1} , а для головоногих моллюсков – единственной критической влажности в процессе обезвоживания ω_{ki} . Например, при одинаковой начальной влажности сырья 400% критическая точка в процессе обезвоживания головоногих моллюсков возникнет при достижении критической влажности 180%, а у рыб – при 315% (рисунок 6).

Кроме того, у головоногих моллюсков период постоянной скорости обезвоживания протекает более интенсивно, чем у рыб при идентичных режимных параметрах и сопоставимых начальных влажностях сырья. Например, при схожих параметрах полугорячей сушки кальмара командорского и путассу тушки (начальная влажность кальмара 387,8%, путассу 399,8%, удельные поверхности тушек 0,23 м²/кг, температура воздуха 67–70°С, его относительная влажность 35–40% и скорость циркуляции 3,5–4,0 м/с) скорость обезвоживания в данный период отличается в 2,4 раза, составляя 10,94 и 4,49%/мин соответственно.

Различный характер обезвоживания объясняется отличием внутренней структуры и термолабильных свойств головоногих моллюсков и рыб, как капиллярно-пористых коллоидных материалов [17–20]. Ткани головоногих моллюсков обладают большей эластичностью, чем у рыб и сохраняют ее значительно дольше в течение процесса тепловой обработки. Напротив, в тканях рыбного сырья капилляры по мере обезвоживания подвергаются существенной усадке с образованием корочки, что затормаживает процесс удаления влаги. Продукт быстро теряет эластичность и в итоге ткани рыб можно легко освободить от костей и разделить на септы [1, 4, 10].

В ходе исследований была предположена возможность обобщения кривых кинетики обезвоживания головоногих моллюсков при разных способах тепловой обработки.

Зависимости (1)–(3) указывают на то, что критические влажности являются функцией начальной влажности. Одновременно продолжительности достижения критических влажностей в совокупности с последними являются координатами критических точек на кривых кинетики сушки. Критические же точки показывают зависимость скорости обезвоживания от жесткости тепловой обработки, размерно-массовых показателей обезвоживаемого материала, его химического состава и свойств. В связи с этим использование безразмерных критериев-симплексов вида $\frac{\tau_i}{\tau_{ki}}, \frac{\tau_i}{\tau_{k1}} \frac{\tau_i}{\tau_{k2}}, \frac{\omega_i}{\omega_{ki}}, \frac{\omega_i}{\omega_{k1}} \frac{\omega_i}{\omega_{k2}}$ при проектировании процессов обезвоживания [12, 13] дают несложные математические зависимости для выявления эффективных режимов тепловой обработки расчетным путем.

Для обобщения кривых кинетики обезвоживания головоногих моллюсков было принято решение использовать безразмерные числа подобия вида

$$\frac{\omega_i}{\omega_{ki}} = f\left(\frac{\tau_i}{\tau_{ki}}\right). \tag{4}$$

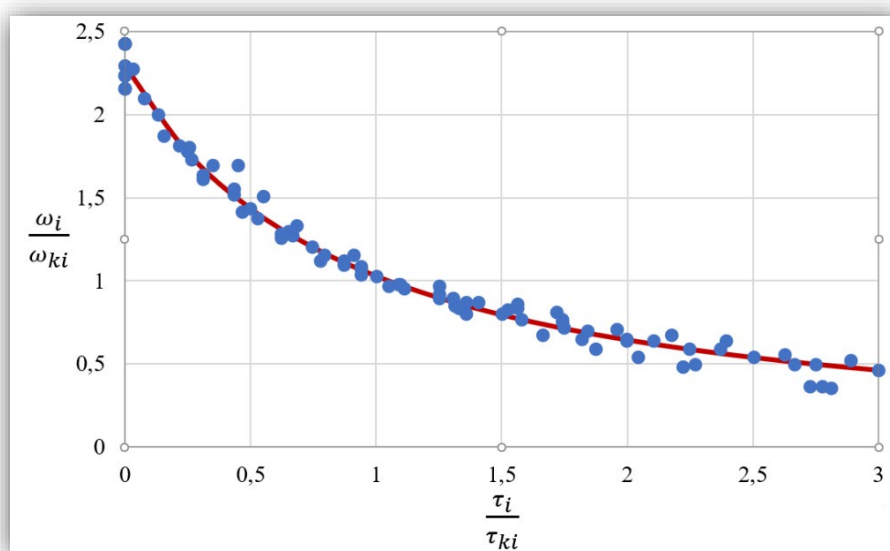


Рисунок 5 – Обобщенная кривая кинетики обезвоживания головоногих моллюсков
 Figure 5. Generalized dehydration kinetics curve for cephalopods

Множество частных кривых кинетики обезвоживания головоногих моллюсков при различных способах и режимах тепловой обработки были сведены в обобщенную кривую (рисунок 5).

Предложено математическое уравнение обобщенной зависимости с применением безразмерных критериев-симплексов

$$\frac{\omega_i}{\omega_{ki}} = 2,296 \left(1 + \frac{\tau_i}{\tau_{ki}}\right)^{-1,158} \quad (5)$$

Для нелинейной регрессионной зависимости (5) критерий Фишера составляет 5273, значимость числовых коэффициентов 99,9%, что в целом указывает на существенную связь между величинами в уравнении.

Зависимость (5) можно использовать в инженерных расчетах для определения текущей влажности головоногих моллюсков в процессе их обезвоживания

$$\omega_i = 2,296 \cdot \omega_{ki} \cdot \left(1 + \frac{\tau_i}{\tau_{ki}}\right)^{-1,158} \quad (6)$$

Либо из выражения (4) можно определить продолжительность достижения их текущей влажности

$$\tau_i = \tau_{ki} \cdot \left(2,049 \left(\frac{\omega_i}{\omega_{ki}}\right)^{-0,863} - 1\right) \quad (7)$$

Для применения обобщенной кривой кинетики обезвоживания в инженерных расчетах нужно знать продолжительность достижения критической влажности ω_{k1} . Учитывая, что процесс обезвоживания до первой критической точки протекает с постоянной скоростью обезвоживания и носит линейный характер, для расчета продолжительности достижения критической влажности можно использовать уравнение [12, 13].

$$\tau_{k1} = \frac{\omega_0 - \omega_{k1}}{N} \quad (8)$$

где N – скорость обезвоживания до первой критической влажности, %/мин.

Скорость обезвоживания материала до первой критической влажности в целом определяет характер процесса. Для каждого исследуемого теплового процесса на основе частных кривых кинетики обезвоживания определяются эмпирические уравнения [7, 12, 13] для нахождения скорости обезвоживания до первой критической влажности, как функциональные зависимости от определяющих процесс факторов (параметров).

Сформулирована следующая номенклатура критериев для изучаемых процессов тепловой обработки головоногих моллюсков:

- процесс инфракрасной сушки

$$N = f\left(\omega_0, \frac{S}{m}, X_{p(\text{ИК})}\right),$$

где ω_0 – начальная влажность сырья, %;

$\frac{S}{m}$ – удельная поверхность сырья (в частном случае косвенно можно учитывать удельную нагрузку пищевого материала на носитель), м²/кг;

$X_{p(\text{ИК})}$ – жесткость режима тепловой обработки (объединяет влияние мощности инфракрасных излучателей);

- процесс бланширования в растительном масле

$$N = f\left(\omega_0, \frac{S}{m}, T_M\right),$$

где T_M – температура рабочей среды (растительного масла);

- процесс полугорячей сушки конвективным способом

$$N = f\left(\omega_0, \frac{S}{m}, x_p, v\right),$$

где $x_p = T \left(1 - \frac{\varphi}{100}\right)$ – жесткость режима тепловой обработки, обусловленная влиянием на процесс

тепло-влажностными параметрами – температурой сушильного агента в камере T (К) и его относительной влажностью φ , %;

v – скорость циркуляции сушильного агента в контуре, м/с.

Учитывая различный характер процессов обезвоживания головоногих моллюсков и рыбного сырья, целесообразно для первых использовать предложенные математические зависимости (3)–(8) при проектировании оптимальных режимов тепловой обработки при различных способах энергоподвода.

Заключение

При исследовании процессов обезвоживания головоногих моллюсков при различных способах энергоподвода и режимах тепловой обработки установлено, что в отличие от рыбного сырья, здесь имеет место только одна критическая точка, обусловленная соответствующей структурой тканей капиллярно-пористых коллоидных тел.

Получено математическое выражение для нахождения критической влажности при обезвоживании головоногих моллюсков. На основе анализа результатов исследований отмечена необходимость использования разных уравнений для расчета критических влажностей в инженерных расчетах при проектировании режимов обезвоживания рыбы и головоногих моллюсков.

Предположение о возможности обобщения частных кривых кинетики обезвоживания головоногих моллюсков при различных режимах тепловых процессов подтвердилось. Предложены симплексы подобия, позволяющие свести множество кинетических зависимостей обезвоживания головоногих моллюсков с разным размерно-массовым и химическим составом при разных режимных параметрах процессов в одну обобщенную зависимость. Предложено ее математическое описание. Определена номенклатура критериев для скорости обезвоживания в обобщенной зависимости при различных способах тепловой обработки головоногих моллюсков.

Цель исследования достигнута. Новые научные результаты, полученные при моделировании процессов обезвоживания головоногих моллюсков, могут быть практически использованы для проектирования оптимальных режимов расчетно-аналитическим путем и создания новых ресурсо- и энергоэффективных промышленных технологий и техники обработки водных объектов промысла.

Литература

1. Гинзбург А.С., Савина И.М. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 280 с.
2. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
3. Bellagha S., Amami E., Farhat A., Kechaou N. Drying kinetics and characteristic drying curve of lightly salted sardine (*Sardinella aurita*). *Drying Technology*. 2002, V. 20, Is. 7, pp. 1527–1538. DOI: 10.1081/DRT-120005866
4. Ortiz-Viedma J., Lemus-Mondaca R., Vega-Gálvez A. et al. Influence of air-drying temperature on drying kinetics, colour, firmness and biochemical characteristics of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fillets. *Food Chemistry*. 2013, V. 139, pp. 162–169. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.01.037
5. Ozuna C., Cárcel J.A., Walde P.M., Garcia-Perez J.V. Low-temperature drying of salted cod (*Gadus morhua*) assisted by high power ultrasound: Kinetics and physical properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2014, V. 23, pp. 146–155. DOI: 10.1016/j.ifset.2014.03.008
6. Yuvanaree N., Warunee T., Sakamon D., Somchart S. Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two-stage drying processes. *Drying Technology*. 2004, V. 22, no. 4, pp. 759–778.
7. Ершов А.М. Развитие и совершенствование процессов холодного копчения на основе интенсификации массопереноса влаги и копильных компонентов: дис. ... д-ра техн. наук. Мурманск: МГАРФ, 1992. 250 с.
8. Shi Q., Xue C-H., Zhao Y., Li J.Z., Wang X.Y., Luan D.L. Optimization of processing parameters of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*. 2008, V. 87, pp. 74–81. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.11.010
9. Vega-Gálvez A., Andres A., Gonzalez E., et al. Mathematical modelling on the drying process of yellow squat lobster (*Cervimunida jhoni*) fishery waste for animal feed. *Animal Feed Science and Technology*. 2009, V. 151, pp. 268–279. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2009.01.003
10. Вороненко Б.А., Гусев Б.К., Пеленко В.В., Стариков В.В. Аналитическое решение задачи совместного тепло- и массопереноса в процессе горячей сушки мясных и рыбных продуктов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2009. № 9. С. 171–176.
11. Chavan B., Yakupitiyage A., Kumar S. Mathematical modeling of drying characteristics of Indian mackerel (*Rastrilliger kangurta*) in solar-biomass hybrid cabinet dryer. *Drying Technology*. 2008, V. 26, pp. 1–11. DOI: 10.1080/07373930802466872
12. Глазунов Ю.Т., Ершов А.М., Ершов М.А., Похольченко В.А. Процессы сушки, копчения, вяления рыбы и их аппаратное оформление. Калининград: Изд-во Калининград. гос. техн. ун-та, 2013. 220 с.

13. Похольченко В.А., Ершов А.М., Ершов М.А. Кинетика процессов обезвоживания и нагрева рыбы при обжаривании, полугорячем и горячем копчении // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 1. С. 31–35. DOI: 10.20914/2310-1202-2014-1-31-35
14. Fu X-Y., Xue C-H., Miao B-C., Li J.Z., Zhang Y., Wang Q. Effect of processing steps on the physico-chemical properties of dried-seasoned squid. *Food Chemistry*. 2007, V. 103, no. 2, pp. 287–294.
15. Teixeira M., Tobinaga S. Diffusion model for describing water transport in round squid mantle during drying with a moisture-dependent effective diffusivity. *Journal of Food Engineering*. 1998, V. 36, pp. 169–181.
16. Uribe E., Miranda M., Vega-Gálvez A., Quispe I., Claveria R., Di Scala K. Mass transfer modelling during osmotic dehydration of jumbo squid (*Dosidicus gigas*): influence of temperature on diffusion coefficients and kinetic parameters. *Food and Bioprocess Technology*. 2011, V. 4, pp. 1349–1356. DOI: 10.1007/s11947-010-0336-2
17. Valencia-Pérez A., García-Morales M., Cárdenas-López J., et al. Effect of thermal process on connective tissue from jumbo squid (*Dosidicus gigas*) mantle. *Food Chemistry*. 2008, V. 107, pp. 1371–1378. DOI: 10.1016/j.foodchem.2007.09.060
18. Otwell W., Hamann D. Textural characterization of squid (*Loligo pealei* L.): instrumental and panel evaluations. *Journal of Food Science*. 1979, V. 44, pp. 1636–1643.
19. Rocha F., Vega M. Overview of cephalopod fisheries in Chilean waters. *Fisheries Research*. 2003, V. 60, pp. 151–159.
20. Yoshioka T., Kinoshita Y., Yoshino H., et al. Change in translucency of squid mantle muscle upon storage. *Fisheries Science*. 2003, V. 69, pp. 408–413.

References

1. Ginzburg A.S., Savina I.M. *Mass- and moisture exchange characteristics of food products*. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1982. 280 p. (In Russian)
2. Lykov A.V. *Drying theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p. (In Russian)
3. Bellagha S., Amami E., Farhat A., Kechaou N. Drying kinetics and characteristic drying curve of lightly salted sardine (*Sardinella aurita*). *Drying Technology*. 2002, V. 20, Is. 7, pp. 1527–1538. DOI: 10.1081/DRT-120005866
4. Ortiz-Viedma J., Lemus-Mondaca R., Vega-Gálvez A. et al. Influence of air-drying temperature on drying kinetics, colour, firmness and biochemical characteristics of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) filets. *Food Chemistry*. 2013, V. 139, pp. 162–169. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.01.037
5. Ozuna C., Cárcel J.A., Walde P.M., Garcia-Perez J.V. Low-temperature drying of salted cod (*Gadus morhua*) assisted by high power ultrasound: Kinetics and physical properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2014, V. 23, pp. 146–155. DOI: 10.1016/j.ifset.2014.03.008
6. Yuvanaree N., Warunee T., Sakamon D., Somchart S. Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two-stage drying processes. *Drying Technology*. 2004, V. 22, no. 4, pp. 759–778.
7. Ershov A.M. The development and improving of the cold smoking processes based on intensification of moisture and smoking agents mass transfer. *Doctor's thesis*. 1992. (In Russian)
8. Shi Q., Xue C-H., Zhao Y., Li J.Z., Wang X.Y., Luan D.L. Optimization of processing parameters of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*. 2008, V. 87, pp. 74–81. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.11.010
9. Vega-Gálvez A., Andres A., Gonzalez E., et al. Mathematical modelling on the drying process of yellow squat lobster (*Cervimunida jhoni*) fishery waste for animal feed. *Animal Feed Science and Technology*. 2009, V. 151, pp. 268–279. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2009.01.003
10. Voronenko B.A., Gusev B.K., Pelenko V.V., Starikov V.V. Analytical solution of the joint heat and mass transfer problem at meat and fish products hot drying process. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2009, no. 9, pp. 171–176. (In Russian)
11. Chavan B., Yakupitiyage A., Kumar S. Mathematical modeling of drying characteristics of Indian mackerel (*Rastrilliger kangurta*) in solar-biomass hybrid cabinet dryer. *Drying Technology*. 2008, V. 26, pp. 1–11. DOI: 10.1080/07373930802466872
12. Glazunov Y.T., Ershov A.M., Ershov M.A., Pokholchenko V.A. *The processes of fish drying, dry-curing, smoking and equipment design*. Kaliningrad, Kaliningrad State Technical University Publ. 2013, 220 p. (In Russian)
13. Pokholchenko V.A., Ershov A.M., Ershov M.A. Kinetics processes of dehydration and heating fish during frying, semi-hot and hot smoking. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2014, no. 1, pp. 31–35. DOI: 10.20914/2310-1202-2014-1-31-35 (In Russian)
14. Fu X-Y., Xue C-H., Miao B-C., Li J.Z., Zhang Y., Wang Q. Effect of processing steps on the physico-chemical properties of dried-seasoned squid. *Food Chemistry*. 2007, V. 103, no. 2, pp. 287–294.
15. Teixeira M., Tobinaga S. Diffusion model for describing water transport in round squid mantle during drying with a moisture-dependent effective diffusivity. *Journal of Food Engineering*. 1998, V. 36, pp. 169–181.

16. Uribe E., Miranda M., Vega-Gálvez A., Quispe I., Claveria R., Di Scala K. Mass transfer modelling during osmotic dehydration of jumbo squid (*Dosidicus gigas*): influence of temperature on diffusion coefficients and kinetic parameters. *Food and Bioprocess Technology*. 2011, V. 4, pp. 1349–1356. DOI: 10.1007/s11947-010-0336-2
17. Valencia-Pérez A., García-Morales M., Cárdenas-López J., et al. Effect of thermal process on connective tissue from jumbo squid (*Dosidicus gigas*) mantle. *Food Chemistry*. 2008, V. 107, pp. 1371–1378. DOI: 10.1016/j.foodchem.2007.09.060
18. Otwell W., Hamann D. Textural characterization of squid (*Loligo pealei* L.): instrumental and panel evaluations. *Journal of Food Science*. 1979, V. 44, pp. 1636–1643.
19. Rocha F., Vega M. Overview of cephalopod fisheries in Chilean waters. *Fisheries Research*. 2003, V. 60, pp. 151–159.
20. Yoshioka T., Kinoshita Y., Yoshino H., et al. Change in translucency of squid mantle muscle upon storage. *Fisheries Science*. 2003, V. 69, pp. 408–413.

Информация об авторах

Вячеслав Александрович Похольченко – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технологического и холодильного оборудования

Александр Михайлович Ершов – д-р техн. наук, профессор

Людмила Александровна Мишанина – канд. биол. наук, доцент, директор медико-биологического института

Information about the authors

Vyacheslav A. Pokholchenko, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Technological and Refrigeration Equipment

Alexander M. Ershov, D. Sci. (Eng.), Professor

Ludmila A. Mishanina, Ph.D. (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 02.02.2024

Одобрена после рецензирования 04.03.2024

Принята к публикации 14.03.2024

The article was submitted 02.02.2024

Approved after reviewing 04.03.2024

Accepted for publication 14.03.2024