

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2584>  
<https://elibrary.ru/DLHLEA>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Адаптация математической модели сушки при комбинированном энергоподводе к икорному рыбному сырью на основе кинетики его обезвоживания



З. М. Арабова<sup>1</sup>, А. Х.-Х. Нугманов<sup>2,\*</sup>, Д. М. Бородулин<sup>2</sup>,  
И. Ю. Алексанян<sup>3</sup>, С. Л. Тихонов<sup>4,5</sup>, Н. В. Тихонова<sup>5</sup>,  
П. Д. Осмоловский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского РАН<sup>ROR</sup>, Москва, Россия

<sup>2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева<sup>ROR</sup>, Москва, Россия

<sup>3</sup> Астраханский государственный технический университет<sup>ROR</sup>, Астрахань, Россия

<sup>4</sup> Уральский государственный лесотехнический университет<sup>ROR</sup>, Екатеринбург, Россия

<sup>5</sup> Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

Поступила в редакцию: 04.03.2025

Принята после рецензирования: 25.04.2025

Принята к публикации: 01.07.2025

\*А. Х.-Х. Нугманов: [nugmanov@rgau-msha.ru](mailto:nugmanov@rgau-msha.ru),  
<https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

З. М. Арабова: <https://orcid.org/0000-0002-6787-7697>

Д. М. Бородулин: <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

И. Ю. Алексанян: <https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

С. Л. Тихонов: <https://orcid.org/0000-0003-4863-9834>

Н. В. Тихонова: <https://orcid.org/0000-0001-5841-1791>

П. Д. Осмоловский: <https://orcid.org/0000-0003-1131-1552>

© З. М. Арабова, А. Х.-Х. Нугманов, Д. М. Бородулин, И. Ю. Алексанян,  
С. Л. Тихонов, Н. В. Тихонова, П. Д. Осмоловский, 2025



### Аннотация.

Удаление влаги (сушка) из биологических материалов дает множество преимуществ, в том числе предотвращает рост микроорганизмов и порчу продукта, а также приводит к снижению затрат на обработку. Разные методы сушки отличаются концептуально и требуют модификации / адаптации в зависимости от высушиваемого биоматериала. Цель исследования – изучить кинетику и оптимальные режимы обезвоживания для повышения эффективности сушки квазижидких продуктов (икорное рыбное сырье) с помощью физико-математического моделирования тепломассопереноса и влагоудаления.

В работе проведена адаптация существующей математической модели сушки на основе данных о кинетике и обезвоживании икры рыб и лецитинового густка из нее при комбинированном энергоподводе. Данная математическая модель необходима для понимания распределения температурного фронта внутри высушиваемого биоматериала и оценки продолжительности сушки. Исследуемые рыбные объекты подвергались обезвоживанию воздушной смесью газов в режиме кондуктивно-конвективного подвода тепловой энергии в лабораторной оригинальной сушильной установке.

Полученные результаты расчетов были сопоставлены с результатами проведенных экспериментальных испытаний сушки для подобных биоматериалов. Рациональными режимными параметрами процесса сушки икорного продукта высушивания: интенсивность движения теплоносителя – 3,50 м/с; высота высушиваемого слоя – 0,01 м; температура поверхности высушиваемого материала и температура греющей пластины – 313 К; начальная температура для объекта исследования – 283 К; итоговая влажность – 0,10 кг/кг. В таком варианте удельная производительность равна 7,610 кг/(м<sup>2</sup>·ч), а время сушки до влажности 0,1 кг/кг – 150 мин. Рациональные режимные параметры процесса сушки лецитинового густка: интенсивность движения теплоносителя – 2,50 м/с; высота слоя – 0,003 м; температура поверхности высушиваемого материала и температура греющей пластины – 343 К; начальная температура для объекта исследования – 328 К; итоговая влажность – 0,130 кг/кг. При этом удельная производительность равна 13,630 кг/(м<sup>2</sup>·ч), а время сушки до влажности 0,130 кг/кг – 40 мин.

Моделирование процессов тепло- и массопереноса позволяет повысить точность расчета и реализовать потенциал энергосбережения без проведения экспериментов, сохраняя при этом качество высушенного продукта. Выявленные кинетические закономерности, оптимальные режимы обезвоживания и результаты моделирования процесса сушки могут быть использованы при проектировании процессов тепло- и массопереноса, а также при проектировании сушильных установок для икорного рыбного сырья.

**Ключевые слова.** Биоэкономика, икорное рыбное сырье, лецитиновый густок, кинетика сушки, комбинированный энергоподвод, математическая модель, метод конечных разностей

**Для цитирования:** Арабова З. М., Нугманов А. Х.-Х., Бородулин Д. М., Алексанян И. Ю., Тихонов С. Л. и др. 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. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2584>

## Combined Energy Supply Drying of Fish Eggs and Lecithin Clot Based on Dehydration Kinetics: Mathematical Model Adaptation

Zarema M. Arabova<sup>1</sup>, Albert Kh.-Kh. Nugmanov<sup>2,\*</sup>,  
Dmitry M. Borodulin<sup>2</sup>, Igor Yu. Aleksanyan<sup>3</sup>,  
Sergey L. Tikhonov<sup>4,5</sup>, Natalya V. Tikhonova<sup>5</sup>,  
Pavel D. Osmolovskiy<sup>2</sup>



<sup>1</sup> Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences<sup>ROR</sup>, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy<sup>ROR</sup>, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Astrakhan State Technical University<sup>ROR</sup>, Astrakhan, Russia

<sup>4</sup> Ural State Forest Engineering University<sup>ROR</sup>, Yekaterinburg, Russia

<sup>5</sup> Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

Received: 04.03.2025

Revised: 25.04.2025

Accepted: 01.07.2025

\*Albert Kh.-Kh. Nugmanov: [nugmanov@rgau-msha.ru](mailto:nugmanov@rgau-msha.ru),

<https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

Zarema M. Arabova: <https://orcid.org/0000-0002-6787-7697>

Dmitry M. Borodulin: <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

Igor Yu. Aleksanyan: <https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

Sergey L. Tikhonov: <https://orcid.org/0000-0003-4863-9834>

Natalya V. Tikhonova: <https://orcid.org/0000-0001-5841-1791>

Pavel D. Osmolovskiy: <https://orcid.org/0000-0003-1131-1552>

© Z.M. Arabova, A.Kh.-Kh. Nugmanov, D.M. Borodulin, I.Yu. Aleksanyan, S.L. Tikhonov, N.V. Tikhonova, P.D. Osmolovskiy, 2025



### Abstract.

Removing moisture from biological materials has many advantages since reduced volume means lower processing costs, and drying prevents microbial growth and spoilage. Despite the fact that different drying methods pursue the same goal, they differ conceptually and require modification / adaptation, depending on the biomaterial. The article describes the kinetics and optimal dehydration modes that increase the drying efficiency of quasi-liquid products (roe and skein complex) using physical and mathematical modeling of heat and mass transfer and moisture removal.

The existing mathematical model for drying with combined energy supply was adapted to fish eggs and lecithin clot. The dehydration kinetics made it possible to understand the temperature distribution inside the dried biomaterial and estimate the drying time. A gas mix served as a drying agent. The calculations were compared with the experimental drying tests for similar biomaterials. The materials were subjected to dehydration in the mode of conductive-convective heat supply in an original laboratory drying unit. The authors identified the kinetic patterns and rational mode parameters to increase the performance.

The rational operating parameters included the intensity of the coolant movement (3.50 m/s); the height of the dried layer (0.01 m); the surface temperature of the dried material and the temperature of the heating plate (313 K); the initial temperature (283 K); the final moisture content (0.10 kg/kg). Under these parameters, the specific productivity was 7.610 kg/(m<sup>2</sup>·h), and the drying time to 0.1 kg/kg humidity was 150 min. The rational operating parameters of the lecithin clot included the coolant feeding rate (2.50 m/s); the layer height (0.003 m); the surface temperature of the dried material and the temperature of the heating plate (343 K); the initial temperature (328 K); the final humidity (0.130 kg/kg). In this case, the specific productivity was 13.630 kg/(m<sup>2</sup>·h), and the drying time to 0.130 kg/kg humidity was 40 min.

Heat and mass transfer modeling increases the accuracy of calculation, making it possible to realize the energy saving potential without preliminary experiments while maintaining the quality of the dried product. In this research, the kinetic patterns, optimal dehydration modes, and drying models can be applied to heat and mass transfer processes under different production conditions, as well as to design new drying units for fish eggs and lecithin curd.

**Keywords.** Bio-economics, caviar raw materials, lecithin clot, drying kinetics, combined energy supply, mathematical model, finite difference method

**For citation:** Arabova ZM, Nugmanov AKh-Kh, Borodulin DM, Aleksanyan IYu, Tikhonov SL, *et al.* Combined Energy Supply Drying of Fish Eggs and Lecithin Clot Based on Dehydration Kinetics: Mathematical Model Adaptation. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3):454–467. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2584>

## Введение

Интенсивная реализация невозобновляемой сырьевой базы при росте населения планеты отрицательно воздействует на окружающую среду, обуславливая необходимость поиска стратегических путей стабильного развития. В таком ракурсе применение альтернативной ресурсной базы взамен ископаемой и разработка возобновляемых технологий, опирающихся на перспективу стабильного развития, является особенно значимой. Трансфер от линейного экономического развития к замкнутой циклической экономике в современных условиях выступает рациональным вектором экологически безопасного и эффективного управления биологическим ресурсом, т. к. концепция стабильного развития в основном опирается на цикличность переработки как востребованного биологического сырья, так и получаемых побочных продуктов. Замкнутая циклическая биоэкономика имеет существенное значение для обеспечения ресурсосбережения, экологической безопасности и стабильности. В ней участвуют продукты биологической природы, и она имитирует или реализует природные процессы, позволяющие эффективно перерабатывать сырьевую базу [1–3]. Согласно Европейской комиссии, под биоэкономикой подразумевают выработку возобновляемых биоресурсов и их трансформацию, а также отходов в материалы с добавленной стоимостью, включая пищевые, кормовые, биопродукты и энергию [4, 5]. В итоге антропогенное использование природной сырьевой базы уменьшается, и приток возобновляемых ресурсов стабилизируется, при этом негативное влияние на окружающую среду минимизируется. Таким образом, рост заинтересованности, в том числе и посредством информационного потока, к более экологически безопасным стабильным процессам способствует повышению внимания к реализации невостребованного рыбного сырья, в частности, к отходам при переработке [6–8].

Ежегодно существенные объемы рыбного сырья не утилизируются и выбрасываются в окружающую среду, снижая ее экологическую безопасность [9–11], или реализуются для выработки малоценных материалов. В настоящий момент отходы рыбного происхождения, сравнимые по доле белка с филе рыб, реализуются преимущественно для получения рыбной муки [12–16]. Химический состав отходов переработки рыбы позволяет обогащать компост и, тем самым, вводить питательные компоненты в почву. Кроме того, отходы имеют перспективу для получения различных сельскохозяйственных удобрений [17], некоторые разработки уже реализуются в сельском хозяйстве [18]. В рыбных отходах присутствует значительная доля органических биоразлагаемых субстанций, реализуемых как субстрат для активного ила с целью повышения эффективности получения метана в процессе анаэробного комплексного сбраживания [19, 20].

Свыше 70 % улова направляется на обработку [21, 22], что обуславливает формирование от 20 до 80 %

отходов с учетом степени переработки, включая потрошение, удаление чешуи, разделку и вид рыбного сырья, т. к. каждому виду свойственен определенный химический и компонентный состав, размерные параметры и форма [23, 24]. Отходы представляют собой мясную обрезь (15–20 %), плавники и кожный покров (1–3 %), кости (9–15 %), головы (9–1 %), внутренние органы (12–18 %) и чешую (5 %) [25–27]. Переработка рыбного сырья особенно важна крупномасштабным рыболовческим организациям для уменьшения расходов на транспортировку и утилизацию, главным образом несъедобных компонентов, а также для роста устойчивости и качественных показателей при очистке от внутренностей, включающих бактерии и ферменты, опасные при обработке и хранении рыбного сырья [28].

Вторичное рыбное сырье из внутренностей включает ястычно-икорный комплекс, который также может применяться с целью производства широкого спектра ценных и дорогих материалов, в том числе функционально ориентированных [29–32]. Значительное содержание белка, полиненасыщенных жирных кислот, макро- и микроэлементов в сравнении с другими внутренностями делает невостребованную икру целесообразным сырьем для последующей реализации оригинальных способов выработки из нее большого спектра инновационных продуктов. В этой связи особое внимание необходимо уделить вопросам ее переработки, например, с использованием сушильных технологий [33–35].

Рыбное сырье является многокомпонентной системой, в которой вода играет важную роль; влажность как ее характеристика определяет консистенцию и структуру вещества, а также влияет на его устойчивость при хранении [36, 37]. Одним из способов консервирования биологических материалов является обезвоживание, обеспечивающее их экономичную транспортировку и хранение до последующей переработки [38–40].

Цель данного исследования – выявление кинетических закономерностей и рациональных режимных параметров процесса обезвоживания для повышения эффективности сушки, а также проведение физико-математического моделирования [41, 42] для анализа тепломассопереноса и механизма влагоудаления в процессе сушки квазижидких продуктов, к которым и относится икорно-ястычный комплекс. Определение энергоемкости процесса обезвоживания на базе термодинамического анализа гигроскопических параметров и комплекса характеристик объектов исследования было осуществлено в предыдущих исследованиях авторов [43].

## Объекты и методы исследования

Объекты исследования – икорный продукт, соответствующий по морфологии IV стадии зрелости, из толстолобика, сазана, судака и сома, выловленных в нижевожском бассейне Астраханской области, а также лецитин-содержащий сгусток, получаемый из указан-

ного икорного сырья. В рекомендованных вариантах сушки икорного продукта и лецитинового сгустка, где в качестве объекта обработки используется икра рыб, предусмотрено влагоудаление из ее слоя на поверхности обогреваемого барабана или ленточного конвейера. При выборе эффективного режима удаления влаги с использованием кондуктивно-конвективного подвода тепловой энергии рационально обеспечить максимально простую конструкцию сушилки и интенсифицировать операцию обезвоживания. Для построения и решения физико-математической модели тепло-массопереноса и выявления его механизма в ходе влагоудаления из квазижидких субстанций следует определить кинетические закономерности как для внутреннего тепло-массопереноса, так и на границе фазового раздела [44, 45].

Среди подходов к анализу кинетики высушивания выделяют аналитические, эмпирические и опытно-аналитические [46, 47]. Кинетические закономерности выявляли посредством статистических способов планирования и обработки опытных результатов, при этом границы варьирования влияющих не кинетику процесса сушки факторов устанавливались с учетом технологических лимитов для обеспечения качественных и, как следствие, потребительских показателей сухого материала. Опытный стенд для решения поставленных задач схематично изображен на рисунке 1.

Данный стенд позволяет регулировать режимные факторы (температура греющей подложки теплового агента, интенсивность его движения, высота слоя навески). Для выявления кинетических закономерностей опытные кривые обезвоживания строятся и математически описываются как закономерность варьирования средней по слою влажности в течение операции сушки.

При обработке опытных результатов за целевую функцию принята удельная производительность или съем высушенного материала  $Y$ , кг/(м<sup>2</sup>·ч):

$$Y = \frac{M}{\tau \times S} \quad (1)$$

где  $M$  – масса сухого образца, кг;  $\tau$  – длительность удаления влаги, ч;  $S$  – площадь, занимаемая навеской, м<sup>2</sup>.

При анализе и моделировании явлений теплообмена между фазами, в частности при конвективном обезвоживании слоя продукта, необходимо определение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), рассчитываемого по опытным данным или из соотношений в обобщенных переменных (критериях) для конкретной ситуации. При влагоудалении из икорного продукта и лецитинового сгустка важно высушить их тонкий слой на поверхности обогреваемого барабана или ленты конвейера, т. е. применить комбинацию контактного (кондуктивного) и конвективного подводов тепловой энергии с каждой стороны слоя соответственно (рис. 2). В связи с этим для расчета  $\alpha$  целесообразно использовать модифицированный метод, приведенный в работах [48, 49].

Соотношение в обобщенных переменных, включающее коэффициент теплоотдачи для теплообмена в пространстве между пластинами (рис. 1) при вынужденной конвекции теплоносителя, выглядит следующим образом:

$$Nu = \frac{\alpha \times L}{\lambda_{sr}} = 0,037 \times Re_L^{0,8} \times Pr_{sr}^{0,43} \times \left( \frac{Pr_{sr}}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad (2)$$

где  $L$  – определяющий размерный параметр, м;  $\lambda_{sr}$  – коэффициент теплопроводности теплового агента, Вт/(м·К);  $Re_L$  – критерий Рейнольдса;  $Pr_{sr}, Pr_s$  – число Прандтля при фиксированной температуре тепло-

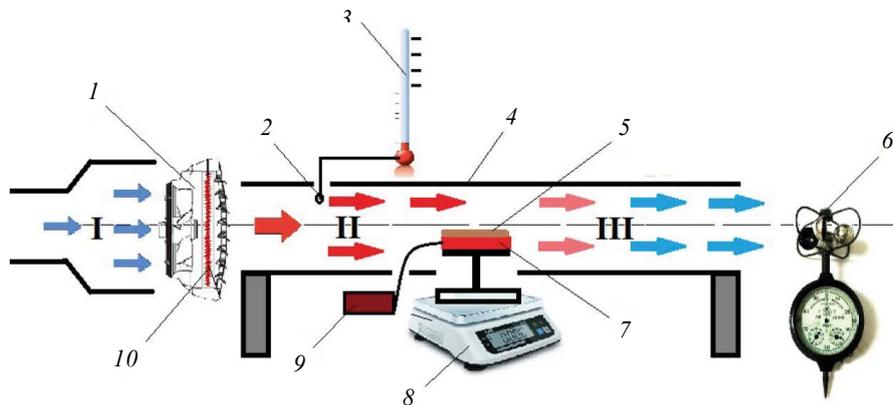


Рисунок 1. Опытный стенд для исследования операции влагоудаления: Потoki: I – охлажденной воздушной среды; II – теплоносителя с определенной температурой и интенсивностью движения; III – отработанного теплоносителя; 1 – воздуходувка; 2 – термодатчик; 3 – термопара; 4 – обечайка установки; 5 – навеска материала; 6 – электронный анемометр; 7 – нагретая подложка; 8 – весовое устройство; 9 – источник электропитания; 10 – калориферный узел

Figure 1. An experimental stand for moisture removal research: Flows of: I – cooled air; II – coolant with a certain temperature and feeding rate; III – spent coolant; 1 – blower; 2 – thermal sensor; 3 – thermocouple; 4 – installation shell; 5 – material attachment; 6 – electronic anemometer; 7 – heated substrate; 8 – weighing device; 9 – power supply; 10 – heater assembly

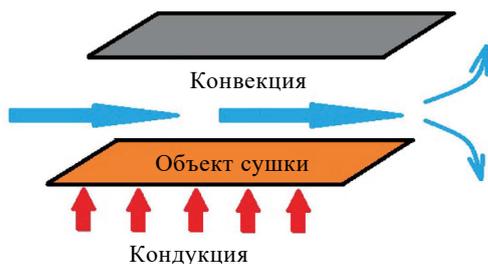


Рисунок 2. Схема обезвоживания икорного продукта для обоснования выбора расчетного уравнения коэффициента теплоотдачи

Figure 2. Dehydration scheme: selecting calculation equation of heat transfer coefficient

носителя на входе в зону сушки и средней температуре на поверхности икорного продукта и лецитинового сгустка.

Определить температуру при сушке в слое икорного продукта и лецитинового сгустка можно теоретически – путем решения системы уравнений тепло-влажноперевода в частных производных, что связано с определенными трудностями и погрешностями. Для упрощения задачи можно ограничиться решением соотношения для переноса тепловой энергии, используя эмпирические и кинетические закономерности процесса обезвоживания. При этом резонно учитывать принципы и допущения, аргументированные в работах [50, 51]. Математическая модель в таком варианте трансформируется при совмещении в одном соотношении системы дифференциального уравнения теплоперевода и опытного уравнения кинетики влагоудаления.

Решение комплексного соотношения проведено методом конечных разностей в среде Mathcad Professional с учетом эмпирических закономерностей варьирования физико-химических характеристик икорного продукта и лецитинового сгустка при обезвоживании. Данный метод подразумевает трансформацию непрерывной задачи в дискретный аналог в форме разностной схемы. Дифференциальное соотношение при этом сводится к системе линейных или нелинейных уравнений с разреженными матрицами. В итоге приближенного численного решения выявляется распределение температуры по узловым точкам сетчатой области в поперечном разрезе слоя икорного продукта и лецитинового сгустка в течение процесса сушки.

В результате принятых допущений и математических преобразований в одномерном варианте комплексное соотношение тепломассопереноса представляется как:

$$\frac{\partial T}{\partial C} = \frac{a}{\partial C / \partial \tau} \times \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r\rho}{c_v} \quad (3)$$

где  $x$  – координата глубины по высоте слоя икорного продукта или лецитинового сгустка, м;  $a$  – их температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\partial C / \partial \tau$  – интенсивность

влагоотдачи,  $\text{кг}/(\text{кг}\cdot\text{с})$ , при условии изотропности слоя по доле сухого остатка в определенный момент времени;  $r$  – энергия фазового превращения и разрыва связи влаги с сухим остатком,  $\text{Дж}/\text{кг}$ , выявленная путем термодинамического анализа статических закономерностей десорбции икорного продукта и лецитинового сгустка;  $\rho$  – их плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c_v$  – их объемная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$ .

При определенных краевых условиях имеем закономерность  $t = f(C, x)$ . Для удобства восприятия при изменении отрицательного знака перед скоростью сушки на положительный и обеспечении роста переменной дифференцирования концентрации в отличие от влажности примем во внимание, что  $C = 1 - W$ .

Граничные условия для теплообмена при контакте икорного продукта и лецитинового сгустка с теплоносителем представим как:

$$\lambda(C) \frac{\partial t}{\partial x} = -\alpha(T_{c.a.} - T_{пов}) \quad (4)$$

где  $T_{c.a.}$  – температура теплоносителя, К;  $T_{пов}$  – температура поверхности икорного продукта и лецитинового сгустка, К.

Граничные условия при контакте икорного продукта с  $T = 283$  К (лецитинового сгустка с 328 К) с греющей поверхностью температурой 313 К (для икорного продукта) и 343 К (для лецитинового сгустка) представляют собой:

$$T_{пов} = 313 - e^{5(c_{нач} - C)} \quad (5)$$

где  $T_{пов}$  – температура поверхности икорного продукта и лецитинового сгустка, К;  $C_{нач}$  – исходная и  $C$  – текущая доля сухого вещества в них,  $\text{кг}/\text{кг}$ .

### Результаты и их обсуждение

Для исследуемого икорного продукта температура теплоносителя, как и греющей подложки, лимитирована значением 313 К, поскольку при превышении данного предела возможна деструкция лецитина. Ввиду этого в ходе применения различных технологий по извлечению лецитина, например из желтка куриных яиц – патент RU2255559C2, авторское свидетельство № 1496746 А1 и [52], используется стадия обезвоживания в роторно-вакуумном аппарате при температуре, не превышающей 313 К. Для лецитинового сгустка обозначенные выше температуры лимитированы значением 343 К согласно температуре предварительной операции экстрагирования. Интенсивность перемещения теплоносителя ограничена 2,7 м/с для лецитинового сгустка и 3,5 м/с для икорного продукта, поскольку превышение этих пределов обуславливает деструкцию пограничного слоя данных материалов.

За фактор, обуславливающий интенсивность сушки от исходной  $W_n$  до итоговой  $W_k$ , приняли высоту слоя ( $h_{вм}$ ). Не варьируемые факторы – интенсивность движения теплоносителя ( $v_{c.a.}$ , м/с) вдоль поверхности

высушиваемого материала, температура сушильного агента ( $T_{с.а.}$ ), греющей пластины ( $T_{г.п.}$ ) и начальная температура для объектов исследования ( $T_{вм.}$ ). Значения варьируемых факторов, влияющих на кинетические характеристики процесса сушки для икорного сырья и лецитин-содержащего сгустка, приведены в таблице 1. Значения не варьируемых факторов, оказывающих воздействие на кинетические характеристики процесса сушки для икорного сырья и лецитин-содержащего сгустка, приведены в таблице 2.

В результате пятикратного дублирования каждого опыта (табл. 3) получены кривые влагоудаления икорного продукта (отдельные кривые показаны на рисунке 3).

Из опытных серий по обезвоживанию икорного продукта (табл. 3) следует, что удельный съем сухого продукта при  $h_{вм.} = 0,005$  м меньше по отношению к  $h_{вм.} = 0,015$  м, несмотря на большую длительность сушки (около 2,5 ч). При рассмотрении среза конечного икорного продукта при  $h_{вм.} = 0,015$  м, судя по изменению цвета от оранжевого до бледно-серого, в нем присутствовали недосушенные участки, что обуславливает рациональную высоту слоя  $h_{вм.} = 0,01$  м.

При изменении высоты важно учитывать, что ее увеличение обуславливает вероятность локального подгорания и растрескивания при пересушке пограничных слоев икорного продукта и влажных внутренних прослоек. При более тонком слое (5 мм) время влагоудаления снижается почти вдвое, что дает возможность

снизить рабочую длину транспортирующего органа. В итоге рациональной высотой принята  $h = 10$  мм, которая после проведения процесса сушки вследствие усадки падает до 6–8 мм.

Таблица 3. Результаты опытной серии по обезвоживанию икорного продукта

Table 3. Experimental dehydration results: fish eggs

$v_{с.а.}$ , м/с	$T_{с.а.}$ , К/ $t_{г.п.}$ , К	$h_{вм.}$ , м	$\tau$ , с	$Y$ , кг/(м <sup>2</sup> ·ч)
Икра толстолобика				
3,5	313/313	0,005	5600	6,85
		0,010	7300	7,85
		0,015	8800	8,71
Икра сазана				
3,5	313/313	0,005	5700	6,78
		0,010	7500	7,72
		0,015	9000	8,57
Икра судака				
3,5	313/313	0,005	6100	6,41
		0,010	7800	7,49
		0,015	9300	8,39
Икра сома				
3,5	313/313	0,005	5900	6,52
		0,010	7700	7,49
		0,015	9200	8,35
Средние значения для икорного сырья				
3,5	313/313	0,005	5825	6,58
		0,010	7575	7,61
		0,015	9075	8,46

Таблица 1. Варьируемые факторы процесса обезвоживания для икорного сырья и лецитин-содержащего сгустка

Table 1. Variable dehydration parameters for fish eggs and lecithin clot

$W_n$ , кг/кг	$h_{вм.}$ , м	$W_k$ , кг/кг
Икорный продукт		
0,66	0,005	0,10
	0,010	
	0,015	
Лецитиновый сгусток		
0,78	0,003	0,13
	0,006	
	0,010	

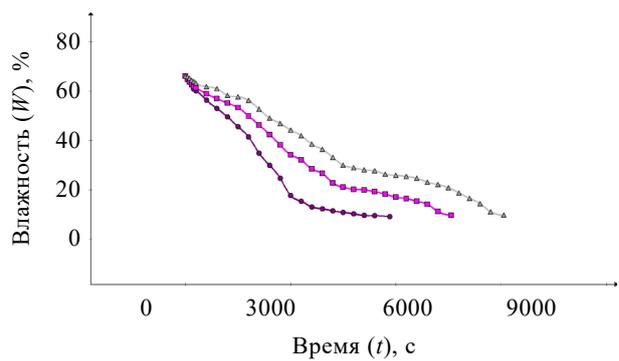
Таблица 2. Не варьируемые факторы процесса обезвоживания для икорного сырья и лецитин-содержащего сгустка

Table 2. Constant dehydration parameters for fish eggs and lecithin clot

$W_n$ , кг/кг	$v_{с.а.}$ , м/с	$T_{с.а.}$ , К	$T_{вм.}$ , К	$T_{г.п.}$ , К	$W_k$ , кг/кг
Икорный продукт					
0,66	3,5	313	283	313	0,10
Лецитиновый сгусток					
0,78	2,5	343	328	343	0,13

Примечание: для подложки  $S = 0,002$  м<sup>2</sup> плотность, кг/м<sup>3</sup>: для толстолобика – 1062, сазана – 1071, судака – 1083, сома – 1069, средняя – 1066,5 (справочная информация).

Note: for a substrate area of 0.002 m<sup>2</sup>, density, kg/m<sup>3</sup>: for silver carp – 1062, carp – 1071, pike perch – 1083, catfish – 1069, average – 1066.5 (reference information).



▲ Высота слоя ( $h_{вм.}$ ) 0,015 м ■ Высота слоя ( $h_{вм.}$ ) 0,010 м ● Высота слоя ( $h_{вм.}$ ) 0,005 м

Параметры сушки: скорость теплоносителя ( $v_{с.а.}$ ) – 3,5 м/с; температура теплоносителя ( $T_{с.а.}$ ) – 313 К; температура подложки ( $T_{г.п.}$ ) – 313 К; температура объекта сушки ( $T_{вм.}$ ) – 283 К

Рисунок 3. Кривые сушки икорного продукта

Figure 3. Drying curves: fish eggs

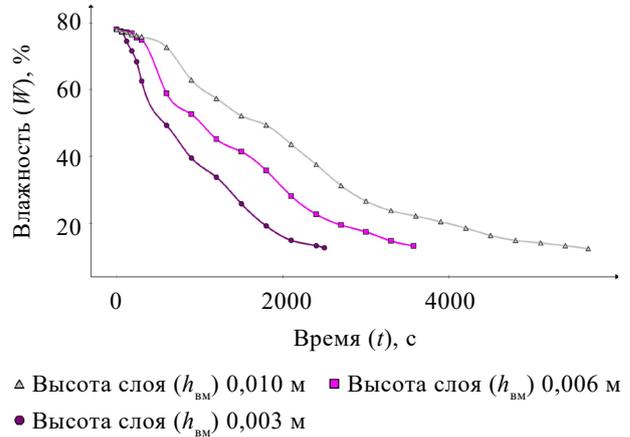
Таким образом, за рациональные режимные параметры процесса сушки икорного продукта выбраны следующие:  $v_{c.a.} = 3,50$  м/с;  $h_{вм} = 0,01$  м;  $T_{c.a.}$  и  $T_{г.п.}$  равны 313 К;  $T_{вм} = 283$  К;  $W_k = 0,10$  кг/кг. В таком варианте  $Y = 7,61$  кг/(м<sup>2</sup>·ч), а время сушки до  $W = 0,1$  кг/кг составит 9000 с.

Результатом опытной серии при пятикратном дублировании каждого опыта (табл. 4) получены кривые влагоудаления лецитинового сгустка (отдельные кривые показаны на рисунке 4).

Из опытных серий по обезвоживанию лецитинового сгустка (табл. 4) следует, что удельный съем сухого продукта при  $h_{вм} = 0,003$  м меньше по отношению к  $h_{вм} = 0,06$  м, при этом разница между величинами удельного съема сухого продукта для этих двух показателей оказалась незначительной. Использование в процессе сушки слоя лецитинового сгустка толщиной 3 мм приводит к сокращению времени сушки на 43 %, что позволяет снизить рабочую длину транспортирующего органа. Это незначительно уменьшает удельный съем сухого продукта. Исходя из приведенных результатов, рекомендована рациональная высота исходного слоя, равная 3 мм. После проведения процесса сушки, с учетом усадки, высота слоя конечного продукта составит от 1,0 до 1,2 мм.

Таким образом, рациональные режимные параметры процесса сушки лецитинового сгустка:  $v_{c.a.} = 2,50$  м/с;  $h_{вм} = 0,003$  м;  $T_{c.a.}$  и  $T_{г.п.}$  равны 313 К;  $T_{вм} = 328$  К;  $W_k = 0,130$  кг/кг. При этом  $Y = 13,630$  кг/(м<sup>2</sup>·ч), а время сушки до  $W = 0,130$  кг/кг составит 2400 с.

Механизм влагопереноса можно выявить и проанализировать более наглядно с помощью закономерностей изменения его интенсивности, которые иллюстрируют кривые скорости высушивания. Эти кривые, полученные путем дифференцирования и математической обработки данных сушки, отражают зависимость скорости высушивания от концентрации продукта. Для упрощения аргумент времени в кинетических зависимостях



Параметры сушки: скорость теплоносителя ( $v_{c.a.}$ ) – 2,5 м/с; температура теплоносителя ( $T_{c.a.}$ ) – 343 К; температура подложки ( $T_{г.п.}$ ) – 343 К; температура объекта сушки ( $T_{вм}$ ) – 328 К

Рисунок 4. Кривые сушки лецитинового сгустка

Figure 4. Drying curves: lecithin clot

Таблица 4. Результаты опытной серии по обезвоживанию лецитинового сгустка

Table 4. Experimental dehydration results: lecithin clot

$v_{c.a.}$ , м/с	$T_{c.a.}$ , К/ $T_{г.п.}$ , К	$h_{вм}$ , м	$\tau$ , с	$Y$ , кг/(м <sup>2</sup> ·ч)
Икра толстолобика				
2,5	343/343	0,003	2700	12,48
		0,006	3600	14,04
		0,010	5700	11,85
Икра сазана				
2,5	343/343	0,003	2400	14,06
		0,006	3500	14,56
		0,010	5800	11,70
Икра судака				
2,5	343/343	0,003	2500	13,61
		0,006	3700	13,67
		0,010	5500	12,27
Икра сома				
2,5	343/343	0,003	2400	14,10
		0,006	3500	14,61
		0,010	5700	11,96
Средние значения для икорного сырьа				
2,5	343/343	0,003	2500	13,63
		0,006	3575	14,25
		0,010	5675	11,91

Примечание: для подложки  $S = 0,002$  м<sup>2</sup> плотность лецитинового сгустка, кг/м<sup>3</sup>: для толстолобика – 936; для сазана – 942; для судака – 939; для сома – 945; средняя плотность – 940,5 (справочная информация).

Note: for a substrate area of 0.002 m<sup>2</sup>, density, kg/m<sup>3</sup>: for silver carp – 936; carp – 942; pike perch – 939, catfish – 945; average – 940.5 (reference information).

заменен на концентрации с помощью обратных функций  $\tau = f(C)$ , представленных на рисунке 5 и описанных математически:

для икорного продукта

$$\tau = 6,779 \times 10^4 C^3 - 1,117 \times 10^5 C^2 + 6,942 \times 10^4 C - 1,359 \times 10^4 \quad (6)$$

для лецитинового сгустка

$$\tau = 8490,8C^3 - 9303,6C^2 + 5286,2C - 777,6 \quad (7)$$

Сразу после взятия производной от уравнений 6 и 7 по  $C$ , кг, имеем  $\partial C / \partial \tau = f(C)$ , а далее – ее обратную функцию:

$$\partial C / \partial \tau = \frac{1}{f(C)}$$

Данная функция представлена на рисунке 6, описана математически:

для икорного продукта

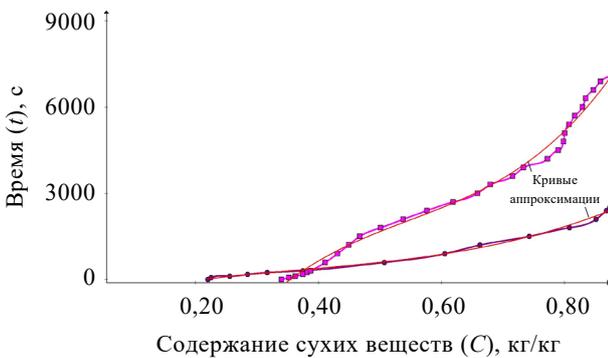
$$\partial C / \partial \tau = \frac{1}{20,337 \times 10^4 C^2 - 2,234 \times 10^5 C + 6,942 \times 10^4} \quad (8)$$

для лецитинового сгустка

$$\partial C / \partial \tau = \frac{1}{25472,4C^2 - 18607,2C + 5286,2} \quad (9)$$

На кинетических кривых (рис. 6) прослеживаются две стадии влагоудаления, что соответствует данным [41, 45, 49–51].

На первой стадии влагоудаление повышается до пика  $\partial C / \partial \tau$  по причине отвода от границы фазового раздела



- Параметры сушки икры: скорость теплоносителя ( $v_{с.а.}$ ) – 3,5 м/с; температура теплоносителя ( $T_{с.а.}$ ) – 313 К; температура подложки ( $T_{г.п.}$ ) – 313 К; температура объекта сушки ( $T_{вм.}$ ) – 273 К; высота слоя ( $h_{вм.}$ ) – 10 мм
- Параметры сушки лецитинового сгустка: скорость теплоносителя ( $v_{с.а.}$ ) – 2,5 м/с; температура теплоносителя ( $T_{с.а.}$ ) – 343 К; температура подложки ( $T_{г.п.}$ ) – 343 К; температура объекта сушки ( $T_{вм.}$ ) – 328 К; высота слоя ( $h_{вм.}$ ) – 3 мм

Рисунок 5. Обратные кривые сушки

Figure 5. Inverse drying curves

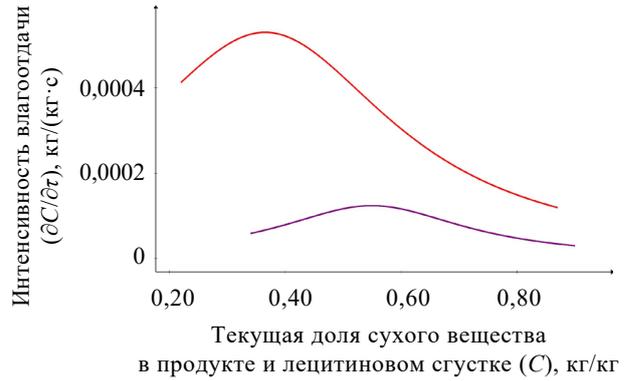


Рисунок 6. Кинетические кривые икорного продукта и лецитинового сгустка

Figure 6. Kinetic curves: fish eggs and lecithin clot

воды в свободном состоянии. Интенсивное парообразование такой влаги исключает повышение температуры выше заданного предела при несущественной усадке образца, которую можно не учитывать. С ростом концентрации уменьшается зазор между мицеллами дисперсной среды. На этой стадии с повышением температуры начинает формироваться капиллярно-пористая структура икорного продукта. После окончания первой стадии сушки влажность в пограничном слое икорного продукта приобретает гигроскопическую величину, и при повышении температуры начинается отвод воды в связанном состоянии (адсорбционно-связанной и структурной воды).

На втором этапе после пика ввиду роста разницы между расходом парообразной воды от границы фазового раздела и ее расходом при внутреннем массопереносе наблюдается углубление зоны парообразования. Температура при этом растет, стремясь приблизиться к температуре теплоносителя, что может привести к деструкции поверхностных слоев из-за парообразования. Перенос структурной парообразной влаги из замкнутых ячеек термодинамически идентичен переносу жидкой среды. Температура на мениске капилляра или пленке варьируется в зависимости от давления, что определяет превышение скорости внешнего парообразования над скоростью внутренней конденсации (эндо- и экзотермический эффекты с разных сторон мениска).

Показанную на рисунке 2 комбинированную термообработку материала можно интерпретировать как перемещение его вдоль греющей поверхности, так и по каналу. За определяющий размер в первом варианте принимают протяженность, а во втором – размерный параметр поперечного сечения канала. Несмотря на дискуссионность данного вопроса, в случае конвективного обогрева ключевым параметром считают протяженность траектории обдуваемой поверхности контакта с теплоносителем от исходного положения до точки перехода к устойчивому стационарному обмену тепловой

энергией соответственно и к стабилизации коэффициента теплоотдачи. Определяющим размером при продольном обтекании объекта, как правило, принято считать значение, установленное технико-экономическими лимитами при проектировании теплообменных установок.

Проведенные опыты показали, что для сохранения приемлемых органолептических и структурных показателей сухого икорного продукта или лецитинового сгустка (без учета их термолабильности с точки зрения химического состава) предел температуры теплового агента составляет 373 К [50, 51, 53, 54]. Лимит интенсивности его движения – 2,7 м/с для лецитинового сгустка и 3,5 м/с для икорного продукта, вне зависимости от того, используется ли прямо- или противоточная организация процесса влагоудаления. Величина определяющего размера ограничивается 0,5 м в варианте использования эквивалентного диаметра канального сечения  $d_3$ , который рассчитывается следующим образом [54]:

$$d_3 = \frac{4S}{\Pi} \quad (10)$$

где  $S$  – площадь поперечного прямоугольного сечения канала при ширине и высоте 0,5 и 0,125 м соответственно;  $\Pi$  – смоченный периметр участка канала при неполном его заполнении, который определяется как сумма ширины и удвоенной высоты слоя икорного продукта или лецитинового сгустка, при тонком слое высоту можно не учитывать.

Преобразуя соотношение (2) с учетом коррекции числового коэффициента имеем:

$$\alpha = 4,35 \left( \frac{\rho_{sr} \omega_{sr}}{L} \right)^{0,4} \times \frac{\lambda_{sr}^{0,67} \times C_{sr}^{0,33}}{\mu_{sr}^{0,07} \times D^{0,2}} \times \Psi^{0,25} \quad (11)$$

$$\Psi = \frac{Pr_{sr}}{Pr_s} \quad (12)$$

где для теплового агента  $\rho_{sr}$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega_{sr}$  – интенсивность движения, м/с;  $C_{sr}$  – теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\mu_{sr}$  – динамическая вязкость, Па·с;  $D$  – высота канала, м;  $\Psi$  – величина симплекса.

Значение  $L = 0,5$  м может уточняться посредством сопоставления решения модели с применением рассчитанного коэффициента теплоотдачи и опытных результатов по итоговой температуре икорного продукта и лецитинового сгустка. В таблице 5 приведены данные для определения коэффициента теплоотдачи при наибольшей допустимой  $T = 273$  К теплового агента при влагоудалении из икорного продукта и лецитинового сгустка.

Величина симплекса ( $\Psi$ ) обусловлена средней температурой поверхности слоя материала, влияющей на скорость обезвоживания, поскольку рост температуры приводит к увеличению сушильного потенциала теплового агента (психрометрическая разница температур) и, как следствие, к повышению интенсивности внутреннего влагопереноса при увеличении коэффициента теплопроводности икорного продукта и лецитинового сгустка.

Процесс обезвоживания можно охарактеризовать посредством зависимостей температуры объектов влагоудаления от его длительности [57]. У множества пищевых материалов при промышленном обезвоживании наблюдается разница между температурой теплоносителя и объекта обезвоживания в 15–20 %. Из этих соображений для расчета симплекса принимаем среднюю поверхностную температуру икорного продукта и лецитинового сгустка, равную  $\approx 353$  К.

В таблице 6 приведены результаты расчета с учетом кинематической вязкости и температуропроводности теплового агента.

На рисунке 7 показана графическая закономерность варьирования  $\alpha$  в зависимости от  $\omega_{sr}$  при принудительной конвекции и  $T \approx 373$  К теплового агента, а образца  $\approx 353$  К.

Графическая зависимость, представленная на рисунке 7, позволяет оперативно определить величину  $\alpha$  по значению скорости сушильного агента. Оперативность выражается тем, что значение сушильного агента для конкретных условий конвективной сушки является постоянной величиной, а погрешность определяемого  $\alpha$ , получаемая графическим методом, укладывается в допустимые для инженерных расчетов пределы.

Таблица 5. Данные для определения коэффициента теплоотдачи

Table 5. Data for determining the heat transfer coefficient

$D$ , м	$\omega_{sr}$ , м/с	$\mu_{sr}$ , Па·с [56]	$\rho_{sr}$ , кг/м <sup>3</sup> [56]	$L$ , м	$C_{sr}$ , Дж/(кг·К) [56]	$\lambda_{sr}$ , Вт/(м·К) [56]
0,1250	2,70	$21,91 \cdot 10^{-6}$	0,947	0,50	1008	0,032

Таблица 6. Результаты расчета симплекса

Table 6. Simplex calculation results

$t$ , К	Место определения	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$\alpha$ , м <sup>2</sup> /с	$\Psi$
373	ядро теплового агента	$23,131 \cdot 10^{-6}$	$33,6110^{-6}$	0,986
353	на поверхности теплового агента	$21,089 \cdot 10^{-6}$	$30,19 \cdot 10^{-6}$	

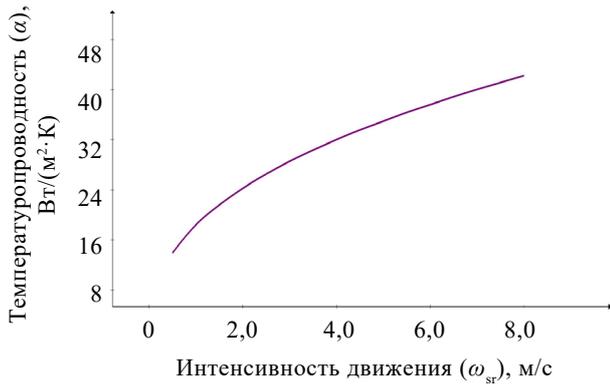


Рисунок 7. Закономерность варьирования температуропроводности в зависимости от интенсивности движения

Figure 7. Variation patterns for thermal conductivity ( $\alpha$ ) depending on feeding rate ( $\omega_{sr}$ )

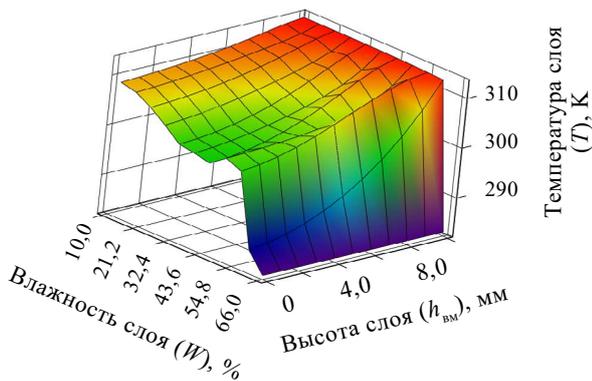


Рисунок 8. Характер продвижения фронта температуры по слою икорного продукта в процессе сушки

Figure 8. Temperature front movement during drying: fish eggs

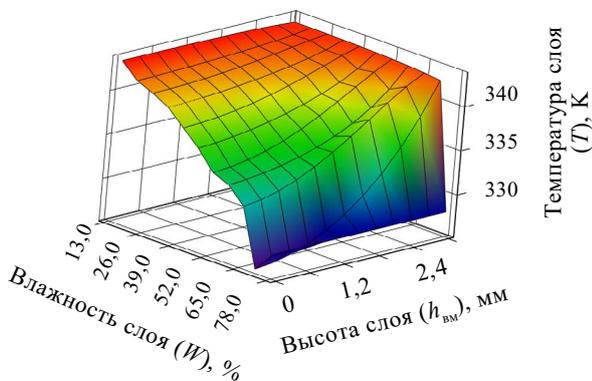


Рисунок 9. Характер продвижения фронта температуры по слою лецитинового сгустка в процессе сушки

Figure 9. Temperature front movement during drying: lecithin clot

На рисунках 8 и 9 показан характер продвижения фронта температуры по слою икорного продукта и лецитинового сгустка в процессе сушки, выявленный путем решения математической модели (3).

По результатам анализа модельных температурных зависимостей, представленных на рисунках 8 и 9, можно заключить, что при произвольной текущей влажности икорного продукта и лецитинового сгустка градиенты температуры возникают из-за инерции теплопереноса в объеме их слоев. Характер продвижения фронта температуры по слою икорного продукта и лецитинового сгустка в процессе сушки объясняется интенсивным парообразованием воды в свободном состоянии на начальном этапе влагоудаления и парниковым эффектом, возникающим ввиду повышения давления пара во временно замкнутых ячейках, которые разрушаются при формировании капиллярно-пористой структурной организации обезвоживаемой субстанции. Парообразование обуславливает отведение тепла при падении температуры образца, преимущественно в пограничном к теплоносителю слое. На графиках эта дифференциация хорошо заметна. В частности, на рисунке 9 для лецитинового сгустка данный эффект фиксируется уже в начале процесса, когда температура от глубины до середины слоя снижается на 3 К в диапазоне 324–327 К от исходного значения 328 К.

На начальном этапе обезвоживания квазижидких икорных продуктов при их взаимодействии с нагретым до  $T_{г.п.}$  полотном температура пограничной прослойки возрастает, экспоненциально приближаясь к  $T_{г.п.}$  и далее сравнивается с ней. На границе контакта икорных квазижидких материалов с сушильным агентом при  $T_{пов.}$  и в пограничных к нему слоях первоначально присутствуют температурные скачки от исходной  $T_{вм.}$  до температуры мокрого термометра, соответствующей  $T_{с.а.}$  и относительной влажности теплоносителя. Далее наблюдается перманентный рост  $T_{вм.}$ . Ее температура в конечном итоге может стать идентичной  $T_{с.а.}$ , как это происходит в случае обезвоживания лецитинового сгустка.

### Выводы

С целью совершенствования и интенсификации влагоудаления из икорного продукта и лецитинового сгустка при кондуктивно-конвективном подводе тепла выявлены рациональные режимные параметры процесса их сушки.

В качестве рациональных режимных параметров процесса сушки икорного продукта выбраны:  $v_{с.а.} = 3,50$  м/с;  $h_{вм.} = 0,01$  м;  $T_{с.а.}$  и  $T_{г.п.}$  равны 313 К;  $T_{вм.} = 283$  К;  $W_k = 0,10$  кг/кг. При таких условиях  $Y = 7,610$  кг/(м<sup>2</sup>·ч), а время сушки до  $W = 0,1$  кг/кг составит 9000 с.

Рациональные режимные параметры процесса сушки лецитинового сгустка:  $v_{с.а.} = 2,50$  м/с;  $h_{вм.} = 0,003$  м;  $T_{с.а.}$  и  $T_{г.п.} = 313$  К;  $T_{вм.} = 328$  К;  $W_k = 0,130$  кг/кг. При этом  $Y = 13,630$  кг/(м<sup>2</sup>·ч), а время сушки до  $W = 0,130$  кг/кг составит 2400 с.

Моделирование процесса сушки икорного продукта и лецитинового стукта показало, что при рекомендованных режимных параметрах их температуры не выйдут за рамки технологических ограничений и могут быть реализованы в производственных условиях при получении лецитин-содержащих пищевых материалов.

Таким образом, с помощью моделирования процессов тепло- и массопереноса можно без привлечения экспериментов повысить точность расчета и реализовать потенциал энергосбережения при сохранении качества высушенного изделия. Выявленные кинетические закономерности, рациональные режимы обезвоживания, а также результаты моделирования процесса сушки могут применяться при проектировании процессов тепломассопереноса, а также при проектировании сушильных установок для икорного продукта и лецитинового стукта с учетом того, что полученные данные не противоречат апробированным результатам других исследователей.

#### Критерии авторства

А. Х.-Х. Нугманов и С. Л. Тихонов руководили проектом, предложили методику проведения экспериментов. З. М. Арабова и Н. В. Тихонова осуществляли экспериментальные исследования, подгото-

вили рукопись. Д. М. Бородулин организовал производственные испытания, корректировал рукопись до подачи в редакцию. И. Ю. Алексанян проводил консультации в ходе исследования. П. Д. Осмоловский проводил поиск литературных источников и патентный поиск по исследуемой проблеме. Все авторы несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Contribution

A.Kh.-Kh. Nugmanov and S.L. Tikhonov supervised the project and developed the methodology. Z.M. Arabova and N.V. Tikhonova conducted the experiments and wrote the manuscript. D.M. Borodulin organized the production tests and proofread the manuscript. I.Yu. Aleksanyan provided consultations. P.D. Osmolovskiy reviewed scientific publications and patents. All authors are responsible for any potential plagiarism.

#### Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest regarding the publication of this article.

#### Список литературы / References

1. Coppola D, Lauritano C, Esposito FP, Riccio G, Rizzo C, et al. Fish waste: From problem to valuable resource. *Marine drugs*. 2021;19(2):116. <https://doi.org/10.3390/md19020116>
2. Ткаченко Т. И., Гришков М. А., Яценко М. Р. О проблемах переработки рыбных отходов при производстве рыбной кормовой муки и возможные пути их решения. *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2023. Т. 65. № 3. С. 34–39. [Tkachenko TI, Grishkov MA, Yatsenko MR. On the problems of processing fish waste in the production of fish feed meal and possible solutions. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2023;65(3):34–39. (In Russ.)] <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2023-65-05>
3. Mohan SV, Varjani S, Pant D, Sauer M, Chang J-S. Circular bioeconomy approaches for sustainability. *Bioresource Technology*. 2020;318:124084. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124084>
4. Marcineková L, Palátová P, Výboštok J, Jarský V, Riedl M, et al. Students' perception of bioeconomy as an important factor in communicating and further development of the bioeconomy in Slovakia and the Czech Republic. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2023;38(4):265–274. <https://doi.org/10.1080/02827581.2023.2211806>
5. Ахметзянова Р. Р. Проблемные аспекты биоэкономики в России. *Law Afterknown: право за гранью обыденного: материалы II Междунар. молодежного юр. форума. Тюмень, 2023*. С. 333–338. [Akhmetzyanova RR. Problematic aspects of bioeconomics in Russia. *Law Afterknown: Proceedings of the II International Youth Legal Forum*. 2023;333–338. (In Russ.)]
6. Shahidi F, Vafatharajan V, Peng H, Senadheera R. Utilization of marine by-products for the recovery of value-added products. *Journal of Food Bioactives*. 2019;(6):10–61. <https://doi.org/10.31665/JFB.2019.5183>
7. Shavandi A, Hou Y, Carne A, McConnell M, Bekhit AE-D. Chapter four – Marine waste utilization as a source of functional and health compounds. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2019;87:187–254. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2018.08.001>
8. Coppola D, Oliviero M, Vitale GA, Lauritano C, d'Ambra I, et al. Marine collagen from alternative and sustainable sources: Extraction, processing and applications. *Marine drugs*. 2020;18(4):214. <https://doi.org/10.3390/md18040214>
9. Arvanitoyannis IS, Kassaveti A. Fish industry waste: Treatments, environmental impacts, current and potential uses. *International Journal of Food Science and Technology*. 2008;43(4):726–745. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01513.x>
10. Филонов А. Е., Ахметов Л. И., Ветрова А. А., Иванова А. А., Сазонова О. И. и др. Современное состояние и тенденции в экологической биотехнологии. *Biologia et Biotechnologia*. 2024. № 1. С. 22–51. [Filonov AE, Akhmetov LI, Vetrova AA, Ivanova AA, Sazonova OI, et al. Current status and trends in environmental biotechnology. *Biologia et Biotechnologia*. 2024;(1):22–51. (In Russ.)] <https://doi.org/10.61847/pberas.bbt.2024.1.2>

11. Бодрякова Н. П., Есепенок К. В., Двинских Н. А. Экологические аспекты утилизации отходов рыбной промышленности. Актуальные вопросы зоологии, экологии и охраны природы. 2022. С. 29–35. [Bodyryakova NP, Eserpenok KV, Dvinskikh NA. Ecological aspects of fishery waste management. Topical Issues of Zoology, Ecology and Nature Protection. 2022;29–35. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/CLEABX>
12. Mo WY, Man YB, Wong MH. Use of food waste, fish waste and food processing waste for China's aquaculture industry: Needs and challenge. Science of The Total Environment. 2018;613–614:635–643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.321>
13. Stevens JR, Newton RW, Tlusty M, Little DC. The rise of aquaculture by-products: Increasing food production, value, and sustainability through strategic utilization. Marine Policy. 2018;90:115–124. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.12.027>
14. Beheshti M, Parrish CC, Wells J, Taylor R, Rise M, et al. Minimizing marine ingredients in diets of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*): Effects on growth performance and muscle lipid and fatty acid composition. PLOS ONE. 2018;13(9): e0198538. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198538>
15. Соколов С. А. Оценка технических, эксплуатационных и социально-экономических факторов количественного роста отходов и побочных продуктов рыбного промысла. Инновационные направления интеграции науки, образования и производства. 2023. С. 292–298. [Sokolov SA. Technical, operational, and socio-economic factors of quantitative growth of waste and by-products in fishery. Innovative directions of integration of science, education, and production. 2023;292–298. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/WIRVOB>
16. Шамсиев А. М., Крякунова Е. В. Получение кормовой муки из вторичных ресурсов рыбопереработки в условиях малого предприятия. Пищевые инновации и биотехнологии. 2021. С. 281–283. [Shamsiev AM, Kryakunova EV. Obtaining feed flour from secondary fish processing resources in a small enterprise. Food innovation and biotechnology. 2021; 281–283. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/LQGXDG>
17. Ahuja I, Daukšas E, Remme JF, Richardsen R, Løes A-K. Fish and fish waste-based fertilizers in organic farming – With status in Norway: A review. Waste Management. 2020;115:95–112. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.025>
18. Løes AK, Katsoulas N, Caceres R, de Cara M, Cirvilleri G, et al. Current use of peat, plastic and fertiliser inputs in organic horticultural and arable crops across Europe. Brussels: European Commission; 2018.
19. Wu Y, Song K. Anaerobic co-digestion of waste activated sludge and fish waste: Methane production performance and mechanism analysis. Journal of Cleaner Production. 2021;279:123678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123678>
20. Choe U, Mustafa AM, Lin H, Xu J, Sheng K. Effect of bamboo hydrochar on anaerobic digestion of fish processing waste for biogas production. Bioresource technology. 2019;283:340–349. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.084>
21. Hou Y, Shavandi A, Carne A, Bekhit AA, Ng TB, et al. Marine shells: Potential opportunities for extraction of functional and health-promoting materials. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2016;46(11–12):1047–1116. <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1202669>
22. Ким И. Н., Комин А. Э. Основные виды фальсификации водных биологических ресурсов. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК–продукты здорового питания. 2021. № 2. С. 147–154. [Kim IN, Komin AE. Main types of water falsification biological resources. Technologies of the food and processing industry of the agroindustrial complex–healthy food products. 2021;(2):147–154. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2021-2-147-154>
23. Rustad T, Storrø I, Slizyte R. Possibilities for the utilisation of marine by-products. International Journal of Food Science and Technology. 2011;46(10):2001–2014. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02736.x>
24. Arnaud C, de Lamballerie M, Pottier L. Effect of high pressure processing on the preservation of frozen and re-thawed sliced cod (*Gadus morhua*) and salmon (*Salmo salar*) fillets. High Pressure Research. 2018;38(1):62–79. <https://doi.org/10.1080/08957959.2017.1399372>
25. Никифорова А. П. Обзор методов рациональной переработки отходов рыбных производств. Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли. 2021. С. 263–267. [Nikiforova AP. Methods of rational processing of fish waste: The review. Comprehensive research in the fisheries industry. 2021;263–267. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/THIISW>
26. Маркин С. Ю., Мальцев И. В. Биоконверсия отходов АПК как элемент экономики замкнутого цикла. Владимирский земледелец. 2024. № 4. С. 54–59. [Markin SYu, Maltsev IV. Bioconversion of agricultural waste as an element of the closed cycle economy. Vladimir farmer. 2024;(4):54–59. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2024-4110-54-59>
27. Martínez-Alvarez O, Chamorro S, Brenes A. Protein hydrolysates from animal processing by-products as a source of bioactive molecules with interest in animal feeding: A review. Food Research International. 2015;73:204–212. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.04.005>
28. Singh A, Benjakul S. Proteolysis and its control using protease inhibitors in fish and fish products: A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2018;17(2):496–509. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12337>
29. Коннова О. И., Арабова З. М., Алексанян И. Ю., Нугманов А. Х.-Х., Бакин И. А. и др. Перспективы повышения эффективности процессов экстракции каротиноидов из побочных продуктов переработки биологического сырья. Современная наука и инновации. 2024. № 4. С. 152–159. [Konnova OI, Arabova ZM, Aleksanyan IYu, Nugmanov ANH, Bakin IA, et al. Prospects for increasing the efficiency of extraction processes of carotenoids from by-products of processing biological raw materials. Modern Science and Innovations. 2024;(4):152–159. (In Russ.)] <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.4.17>

30. Арабова З. М., Нугманов А. Х.-Х., Бородулин Д. М., Алексанян И. Ю., Коннова О. И. Кинетические закономерности экстракции целевых компонентов из икорно-ястычного комплекса и его рафината. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 1. С. 74–88. [Arabova ZM, Nugmanov AKh-Kh, Borodulin DM, Aleksanyan IYu, Konnova OI. Extracting Target Components from Fresh and Refined Sac Roe: Kinetic Patterns. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(1):74–88. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2555>
31. Алдамагов Н. Э., Бредихин С. А. Производство сырья животного происхождения в мире и в России. Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 70. № 4. С. 8–19. [Aldamatov NE, Bredikhin SA. Production of raw materials of animal origin in the world and in Russia. Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2024;70(4):8–19. (In Russ.)] <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-70-01>
32. Быков А. Д., Бражник С. Ю. Современное состояние промышленного рыболовства в Центральном Федеральном округе России и перспективы его развития. Вопросы рыболовства. 2024. Т. 25. № 3. С. 7–26. [Bykov AD, Brazhnik SYu. The current state of industrial fishing in the Central Federal District of Russia and prospects for its development. Fisheries Issues. 2024;25(3):7–26. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36038/0234-2774-2024-25-3-7-26>
33. Al Solami L, Korish M. Proximate composition, fatty acid characteristics, amino acid profile and mineral content of fish *Acanthurus sohal*. Heliyon. 2024;10(16):e36474. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36474>
34. Stepanova EM, Lugovaya EA. Macro-and microelements in some species of marine life from the Sea of Okhotsk. Foods and Raw Materials. 2021;9(2):302–309. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-302-309>
35. Artar E, Olgunoglu MP, Olgunoglu IA. Mineral contents and fatty acids compositions of fillets of female and male Pangas (*Pangasius hypophthalmus*, Sauvage 1878) cultured in Turkey. Progress in Nutrition. 2022;24(3):2022056. <https://doi.org/10.23751/pn.v24i3.12382>
36. Mauer LJ. Moisture and total solids analysis. Nielsen's Food Analysis. Switzerland: Springer International Publishing; 2024. pp. 233–260. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-50643-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-50643-7_15)
37. Fitri N, Chan SXY, Che Lah NH, Faidruz AJ, Misnan NM, et al. A comprehensive review on the processing of dried fish and the associated chemical and nutritional changes. Foods. 2022;11(19):2938. <https://doi.org/10.3390/foods11192938>
38. Дементьева Н. В. Обоснование режимов сушки чипсов из водных биологических ресурсов. Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации: материалы IV Нац. науч.-техн. конф. Владивосток, 2021. С. 203–207. [Dementieva NV. Substantiation of regimes for drying chips from aquatic biological resources. Justification of the modes of drying chips from aquatic biological resources. Innovative development of the fishing industry in the context of ensuring food security of the Russian Federation: Proceeding Nat. Sci. Conf. Vladivostok, 2021. pp. 203–207. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/OXRNGU>
39. Siddiqui SA, Schulte H, Pleisner D, Schönfelder S, Kvangarsnes K, et al. Transformation of seafood side-streams and residuals into valuable products. Foods. 2023;12(2):422. <https://doi.org/10.3390/foods12020422>
40. Lebsky S, Tolok G, Ustylenko I, Kyslytsia Y. State and prospects of fish processing technologies. Scientific Journal Animal Science and Food Technologies. 2023;14(4):9–25. <https://doi.org/10.31548/animal.4.2023.09>
41. Поликарпова В. Э., Алексанян И. Ю., Арабова З. М., Нугманов А. Х.-Х., Хайбулов Р. А. и др. Кинетика конвективной сушки икры сазана как источника лецитина и решение математической модели данной операции. Вестник КрасГАУ. 2023. № 2. С. 218–227. [Polikarpova VE, Aleksanyan IYu, Arabova ZM, Nugmanov AKh-Kh, Khaibulov RA, et al. Kinetics of carp roe convective drying as a lecithin source and the solution of the mathematical model to this operation. Bulletin of KSAU. 2023;(2):218–227. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-2-218-227>
42. Kirchuk R, Zabrodotskaya L, Haponiuk T, Ferents R. Experimental studies and mathematical model of the rapeseed seed drying process. National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines. 2023;158–166. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.158-166>
43. Поликарпова В. Э., Алексанян И. Ю., Арабова З. М., Нугманов А. Х.-Х., Запарожец Е. Ю. Гигроскопические параметры сазаньей икры, как источника лецитина и объекта сушки, и термодинамический анализ статических закономерностей ее взаимодействия с водой. Современная наука и инновации. 2022. № 3. С. 88–96. [Polikarpova VE, Aleksanyan IYu, Arabova ZM, Nugmanov AKh-Kh, Zaporozhets EYu. Hygroscopic parameters of sazan caviar as a source of lecithin and a drying object and thermodynamic analysis of the static regularities of its interaction with water. Modern Science and Innovations. 2022;(3):88–96. (In Russ.)] <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2022.3.8>
44. Фролов Д. И., Павлова Ю. А. Изучение кинетики сушки плодовых выжимок. Инновационная техника и технология. 2022. Т. 9. № 2. С. 42–45. [Frolov DI, Pavlova YuA. Studying the kinetics of drying fruit pomace. Innovative Machinery and Technology. 2022;9(2):42–45. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/UAXJYW>
45. Попов А. М., Плотников К. Б., Устинова Ю. В., Крюк Р. В., Плотникова И. О. Исследование кинетики сушки полидисперсных продуктов. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 3. С. 30–37. [Popov AM, Plotnikov KB, Ustinova YuV, Kruk RV, Plotnikova IO. Investigation of the kinetics of drying polydisperse products. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021;83(3):30–37. (In Russ.)] <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-3-30-37>

46. Стрельченко В. В., Нугманов А. Х.-Х., Алексанян И. Ю., Хадаев А. В., Муханбетова И. Р. Анализ кинетики процесса обезвоживания пектиновых полимерных пленок с целью оценки их сорбционных свойств. Современная наука и инновации. 2024. № 3. С. 105–113. [Strelchenko VV, Nugmanov AN-H, Aleksanyan IYu, Khadaev AV, Mukhanbetova IR. Analysis of the kinetics of the dehydration process of pectin polymer films in order to evaluate their sorption properties. Modern Science and Innovation. 2024;(3):105–113. (In Russ.)] <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2024.3.10>
47. Загоруйко М. Г., Башмаков И. А., Степанов К. А. Исследование процесса сушки растительных отходов в изотермической модели. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17. № 4. С. 49–54. [Zagoruiko MG, Bashmakov IA, Stepanov KA. Investigation of the drying process of plant waste in an isothermal model. Agricultural machinery and technologies. 2023;17(4):49–54. (In Russ.)] <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-49-54>
48. Сабуров Э. Н., Орехов А. Н., Онохин Д. А. Конвективный теплообмен на боковой поверхности рабочего объема относительно длинной циклонной камеры. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. Т. 59. № 6. С. 573–581. [Saburov EN, Orekhov AN, Onokhin DA. Convective heat transfer on the lateral surface of the working volume of a relatively long cyclone chamber. Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. 2016;59(6):573–581. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-573-581>
49. Мещерякова Г. С. Совершенствование процессов в технологии пектинового полимерного покрытия из арбузного сырья: дис. ... канд. техн. наук: 4.3.3. Москва, 2022. 179 с. [Meshcheryakova GS. Improvement of processes in the technology of pectin-containing polymer coating from watermelon raw materials: Diss. Cand. Sci. Eng.: 4.3.3. Moscow, 2022. 179 p. (In Russ.)]
50. Алексанян И. Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.18.12. Астрахань, 2001. 52 с. [Aleksanyan IYu. Development of scientific foundations of high-intensity drying processes for animal and vegetable products: Diss. Dr. Sci. Eng.: 05.18.12. Astrakhan, 2001. 52 p. (In Russ.)]
51. Максименко Ю. А. Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.18.12. Астрахань, 2016. 502 с. [Maksimenko YuA. Development of scientific and practical foundations and improvement of drying processes of plant raw materials in a dispersed state: Diss. Dr. Sci. Eng.: 05.18.12. Astrakhan, 2016. 502 p. (In Russ.)]
52. Способ получения яичного лецитина 05.21-19P1.270П / РЖ 19P-1. Химия и технология пищевых продуктов. 2005. № 21. [Method of obtaining egg lecithin 05.21-19P1.270P / RJ 19P-1. Chemistry and technology of food products. 2005;(21).]
53. Арапов В. М., Арапов М. В., Мамонтов М. В. К вопросу выбора тепловых режимов сушки термолабильных продуктов. Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2006. № 3. С. 8–14. [Arapov VM, Arapov MV, Mamontov MV. On the issue of selecting drying temperature regimes for thermo-labile products. Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel. 2006;(3):8–14. (In Russ.)]
54. Демидов И. Н., Крамаренко А. А. Способы получения фосфолипидных продуктов. Вопросы химии и химической технологии. 2008. Т. 2. С. 58–63. [Demidov IN, Kramarenko AA. Methods for obtaining phospholipid products. Issues of chemistry and chemical technology. 2008;2:58–63. (In Russ.)]
55. Поликарпова В. Э., Алексанян И. Ю., Арабова З. М., Нугманов А. Х.-Х., Эльмурзаев А. А. Определение тепло-технических показателей икры сазана как объекта замораживания и источника лецитина. Индустрия питания. 2022. Т. 7. № 4. С. 25–35. [Polikarpova VE, Aleksanian IYu, Arabova ZM, Nugmanov AN-H, Elmurzaev AA. Thermal parameters measurement of carp caviar as a freeze object and a lecithin source. Food Industry. 2022;7(4):25–35. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2022-7-4-3>
56. Чугаев Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости). 4-е изд., испр. и доп. Ленингр.: Энергоиздат; 1982. 671 с. [Chugaev RR. Hydraulics (Technical fluid mechanics). 4th ed. Leningrad: Energoizdat; 1982. 671 p. (In Russ.)]
57. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии. 5-е изд., стер. М: Химия; 1968. 847 с. [Planovsky AN, Ramm VM, Kagan SZ. Processes and devices of chemical technology. 5th ed. Moscow: Himiya; 1968. 847 p. (In Russ.)]