

Научная статья
УДК [664.951.037.5.001.57:664.955.2]:[639.215:536.24]
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-137-144>
EDN LTWGWL

Адаптация математической модели процесса кондуктивного замораживания к икре сазана как источнику лецитина и ее решение

***В. Э. Поликарпова¹, И. Ю. Александян², З. М. Арабова³,
Е. В. Фоменко⁴, А. Х.-Х. Нугманов⁵, Л. Ю. Лагуткина⁶***

*^{1, 2, 4-6}Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, albert909@yandex.ru*

*³Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского,
Москва, Россия*

Аннотация. В современных условиях пищевая индустрия Российской Федерации нуждается в природных эмульгаторах высокого качества, к примеру в лецитинах. Следует отметить, что карповая, в частности сазанья, икра содержит большое количество лецитина. Анализ позитивных и негативных сторон различных подходов к процессу замораживания и его конструктивному оформлению приводит к выводу о резонности применения (как с технико-энергетической, так и экономической точек зрения) кондуктивного энергоотвода от продукта контактирующей с ним рабочей поверхностью охлаждающей установки, выполненной в виде барабанного узла с подведенным внутрь него холодильным агентом. Учитывая, что температуру по объему объекта замораживания эмпирически определить сложно, целесообразно провести моделирование процессов внутреннего переноса тепловой энергии и обмена ею на границах раздела между образцом и внешней средой, а также охлаждающей поверхностью барабана. Целью исследования послужило решение математической модели внутреннего теплопереноса в процессе замораживания икры сазана при разнородных граничных условиях. Объектом исследования является тонкий слой икры сазана. Реализация математической модели теплопереноса, описывающая замораживание икорного продукта толщиной в 5 мм контактным способом, посредством способа конечных разностей, решена с помощью программного продукта Mathcad Professional. В процессе решения математической модели замораживания выявлено, что в конце процедуры замораживания среднеобъемная температура икры достигает своего рационального значения $-7,5$ °С, при котором икорный продукт может транспортироваться в места хранения. Рациональными режимными параметрами процесса замораживания икорного продукта являются температура окружающего воздуха не выше 20 °С, начальная температура продукта -10 ± 1 °С, температура поверхности барабана – не выше -18 °С, толщина замораживаемого слоя $-5,0 \pm 0,5$ мм, продолжительность замораживания – 10 минут.

Ключевые слова: лецитин, икра сазана, модель теплопереноса, замораживание, теплообмен, температура, толщина слоя

Для цитирования: Поликарпова В. Э., Александян И. Ю., Арабова З. М., Фоменко Е. В., Нугманов А. Х.-Х., Лагуткина Л. Ю. Адаптация математической модели процесса кондуктивного замораживания к икре сазана как источнику лецитина и ее решение // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2023. № 1. С. 137–144. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-137-144>. EDN LTWGWL.

Original article

Adaptation of mathematical model of conductive freezing to carp caviar as lecithin source and its solution

***V. E. Polikarpova¹, I. Yu. Aleksanian², Z. M. Arabova³,
E. V. Fomenko⁴, A. Kh.-Kh. Nugmanov⁵, L. Yu. Lagutkina⁶***

*^{1, 2, 4-6}Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, albert909@yandex.ru*

*³Vernadsky Institute of Geo-chemistry and Analytical Chemistry,
Moscow, Russia*

Abstract. In modern conditions the food industry of the Russian Federation needs high quality natural emulsifiers, for example, lecithins. It should be noted that the carp caviar, in particular, the sazan caviar contains a large amount of lecithin. Analysis of the positive and negative aspects of different approaches to the freezing process and its structural design leads to the conclusion that it is reasonable to use (both from the point of view of technology, power consuming and economy) a conductive energy removal from the product that is in contact with the working surface of the cooling unit made in the form of a drum with a refrigerant supplied inside it. Given that it is difficult to empirically determine the temperature over the volume of the frozen object, it is advisable to simulate the processes of internal transfer of thermal energy and its exchange at the interfaces between the sample and the external environment, as well as the cooling surface of the drum. The aim of the study was a mathematical model solution about internal heat transfer during sazan caviar freezing under heterogeneous boundary conditions. The object of the study is a thin layer of the sazan caviar. Putting into practice the mathematical model of heat transfer, which describes freezing a 5 mm thick caviar product by the contact method by means of the finite difference method was realized by using the Mathcad Professional software product. In the process of solving the mathematical model of freezing, it was revealed that at the end of the freezing procedure, the average volumetric temperature of the caviar reaches its rational value of -7.5°C , after which the caviar product can be transported to the storage places. Rational operating parameters of the caviar product freezing process are: ambient air temperature up to 20°C ; initial product temperature $-10 \pm 1^{\circ}\text{C}$; drum surface temperature up to -18°C ; thickness of the frozen layer $- 5 \pm 0.5$ mm; freezing time = 10 minutes.

Keywords: lecithin, sazan caviar, heat transfer model, freezing, heat exchange, temperature, layer thickness

For citation: Polikarpova V. E., Aleksanian I. Yu., Arabova Z. M., Fomenko E. V., Nugmanov A. Kh.-Kh., Lagutkina L. Yu. Adaptation of mathematical model of conductive freezing to carp caviar as lecithin source and its solution. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry.* 2023;1:137-144. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-137-144>. EDN LTWGWL.

Введение

Повышение эффективности глубокой переработки сырья товарного рыбоводства, в том числе мало востребованной на российском рынке икры пресноводных рыб семейства карповых [1, 2], является важной и актуальной задачей.

В современных условиях пищевая индустрия Российской Федерации нуждается в природных эмульгаторах высокого качества, к примеру, в лецитинах. Следует отметить, что карповая, в частности сазанья, икра содержит большое количество лецитина [3, 4] – около 10 000 мг в 100 г продукта [5]. Согласно данным Европейской ассоциации производителей лецитина, его мировое производство в настоящее время составляет более 250 тыс. т в год, а потребность – более 400 тыс. т в год [6, 7]. При повышающейся востребованности лецитина возникает вопрос выявления новой сырьевой базы для его получения.

Известно, что на параметры лецитина преимущественно воздействует источник его выработки [3, 8], в котором необходимо максимально сохранить его целевые свойства при консервации до момента непосредственного использования в выбранной технологии. Самыми распространенными способами консервации являются сушка и замораживание исходного сырья. Замораживание является перспективным методом консервации, позволяющим максимально сохранить аромат, цветовую гамму, вкусовые ощущения и пищевую ценность материала.

Очевидно, что при выборе нового сырьевого источника для выработки лецитина резонно выявить определяющие ее научно-технические подходы к совершенствованию известных методов или найти оригинальные способы реализации ресурсо- и энер-

госберегающих технологий заморозки икры карповых рыб, а также их технического обеспечения.

Анализ позитивных и негативных сторон различных подходов к процессу замораживания [9–11] и его конструктивному оформлению приводит к выводу о резонности применения – как с технико-энергетической, так и с экономической точки зрения – кондуктивного энергоотвода от продукта контактирующей с ним рабочей поверхностью охлаждающей установки, выполненной в виде барабанного узла с подведенным внутрь него холодильным агентом. Учитывая, что среднеобъемную температуру объекта замораживания эмпирически определить сложно, целесообразно провести моделирование процессов внутреннего переноса тепловой энергии и обмена ею на границах раздела между образцом и внешней средой, а также охлаждающей поверхностью барабана.

Цель исследования – построить, адаптировать к икре сазана и решить математическую модель внутреннего теплопереноса в процессе замораживания при разнородных граничных условиях.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является тонкий слой икры сазана.

Процесс переноса тепловой энергии внутри твердого тела с учетом ее обмена на его границах с внешней средой, описывается известным дифференциальным уравнением теплопроводности [12–14], в котором искомая функция $T = T(r, \tau)$ задает температуру в точке тела с координатами r в момент времени τ :

$$\frac{dT}{d\tau} - a\nabla^2 T = f(r, \tau),$$

где $\frac{dT}{d\tau}$ – интенсивность варьирования T в течение процедуры заморозки во времени τ , град/с; a – показатель теплопроводности, м²/с; ∇^2 – дифференциальный оператор Лапласа; r – принятая координатная система, $r = (r_1, \dots, r_n)$; $f(r, \tau)$ – функция тепловых источников.

Исследуемые процессы переноса тепловой энергии в объекте холодильной обработки и обмена ею на границах раздела между ним и внешней средой, а также охлаждающей поверхностью барабана происходят при отсутствии внутреннего ис-

точника теплоотвода, т. е. $f(r, \tau) \equiv 0$, в этом случае имеем

$$\frac{dT}{d\tau} = a\nabla^2 T. \quad (1)$$

Уравнение (1) в частных производных подходит для описания основной массы процедур теплопроводности, и с целью выявления из них наиболее подходящего резонно сформулировать особенности данной операции, для чего схематично представим физическую интерпретацию предлагаемого способа замораживания икры сазана, консервируемой холодом (рис. 1).

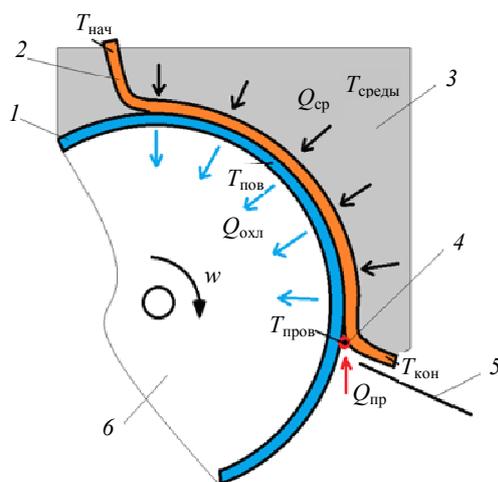


Рис. 1. Схема контактного замораживания сазаньей икры:

- 1 – замораживающая поверхность барабана; 2 – замораживаемый продукт;
- 3 – воздушная среда; 4 – горячая струна для съема продукта с барабана;
- 5 – наклонная полка для удаления замороженного продукта в камеру хранения; 6 – вращающийся барабан;
- $T_{нач}$ – начальная температура объекта заморозки; $T_{среды}$ – температура окружающей среды; $T_{пов}$ – температура поверхности барабана; $T_{пров}$ – температура натянутой струны; $T_{кон}$ – конечная температура объекта заморозки;
- $Q_{сп}$ – тепловая энергия среды, подводимая к объекту заморозки; $Q_{охл}$ – отводимая тепловая энергия от объекта заморозки; $Q_{пр}$ – тепловая энергия струны, подводимая к объекту заморозки;
- w – скорость вращения барабана

Fig. 1. Graph of contact freezing of sazan caviar:

- 1 – freezing surface of the drum; 2 – frozen product; 3 – air environment; 4 – hot string for removing the product from the drum; 5 – inclined shelf for transferring the frozen product to the storage room;
- 6 – rotating drum; $T_{нач}$ – initial temperature of a freezing object; $T_{среды}$ – environmental temperature;
- $T_{пов}$ – drum surface temperature; $T_{пров}$ – tensioned string temperature; $T_{кон}$ – final temperature of the freezing object;
- $Q_{сп}$ – thermal energy of environment supplied to the freezing object; $Q_{охл}$ – thermal energy diverted from a freezing object;
- $Q_{пр}$ – string thermal energy supplied to a freezing object; w – drum rotation

Ввиду малой толщины слоя замораживаемого продукта (5 мм) при большой ширине и протяженности рабочей поверхности барабанного полотна слой объекта исследования можно уподобить бесконечной пластине, т. е. не учитывать его торцевые поверхности и за координату в сетчатом векторе принять глубину слоя по толщине, а за вторую координату, которая и принята в уравнении теплопереноса (1), целесообразно взять время проводимой процедуры.

В итоге уравнение (1) примет следующий вид:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a(T) \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где x – глубина по слою образца, м; τ – длительность замораживания, с.

Как видно, соотношение (2) является уравнением 1-го порядка по длительности операции τ и 3-го порядка по пространственной координате x .

Итак:

Поликарпова В. Э., Александян И. Ю., Арапова З. М., Фоменко Е. В., Нугманов А. Х.-Х., Дагуткина Л. Ю. Адаптация математической модели процесса кондуктивного замораживания к икре сазанья как источнику лепитина и ее решение

- исходная величина x на поверхности слоя у поверхности барабанного узла: $x_n = 0$;
- итоговая величина x у противоположной открытой поверхности слоя: $x_k = 0,005$;
- фиксация времени в начале процедуры: $\tau = 0$;
- фиксация времени в конце процедуры: $\tau = \tau_k$.

В теоретических положениях обычных дифференциальных соотношений для частного их решения определяют граничные условия по пространственной координате. Также для решения соотношения в частных производных определяются краевые, в частности граничные, условия, которые ранжируются на несколько типов, в частности на условия 1-го и 2-го родов. Условия 1-го рода характеризуются, когда на границе задается значение искомой функции, в нашем случае это температура, а граничные условия 2-го рода характеризуются, когда на границе в исследуемом ареале задается не определяемый функционал, т. е. варьирование непосредственно T , а тепловой поток [15–17].

Таким образом, в месте соприкосновения замораживаемого продукта с поверхностью барабана зададимся граничными условиями первого рода, т. е. примем, что температура на поверхности барабана постоянна на протяжении всего процесса теплообмена и равна $T_{пов}$, и только при достижении у образца заданной конечной температуры $T_{кон}$ заменим $T_{пов}$ на $T_{пров}$, которая соответствует температуре нагретой струны. В месте соприкосновения замораживаемого продукта с воздушной средой зададимся условиями 2-го рода:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_{среды} - T_{нас}),$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $T_{среды}$ – температура для воздушной среды при взаимодействии с охлаждаемым образцом, °С; $T_{нас}$ – температура для граничного слоя материала при взаимодействии с воздухом, °С.

Реализация математической модели теплопереноса (2), описывающей замораживание икорного продукта толщиной в 5 мм контактным способом, посредством способа конечных разностей, решена с помощью программного продукта Mathcad Professional.

Результаты и их обсуждение

Согласно представленной схеме икорный продукт толщиной 5 мм, имеющий начальную температуру $T_{нач} = 10$ °С, при контакте с поверхностью вращающегося барабана, имеющей температуру $T_{пов} = -18$ °С, начинает замораживаться. Отметим, что объект консервирования с другой стороны контактирует с воздушной средой, имеющей температуру $T_{среды} = 20$ °С, которая выше $T_{нач}$, что оказывает негативное влияние на скорость замораживания икры. Заметное преобладание отводимой тепловой энергии $Q_{охл}$ от продукта заморозки над подводимой к продукту теплотой от внешней воздушной

среды $Q_{ср}$ в итоге приводит к желаемому результату, и по прошествии некоторого времени в икре достигается заданная среднеобъемная отрицательная температура $T_{кон}$.

Скорость вращения барабана w регулируется таким образом, чтобы путь, проделанный продуктом при непосредственном контакте с поверхностью барабана, не превышал половины длины его окружности. Очевидно, что при контакте икорного продукта с поверхностью барабана, имеющей отрицательное значение температуры $T_{пов}$, между ними произойдет прочное сцепление, которое затруднит удаление замороженной икры из морозильной установки. Для решения этой проблемы в морозильном устройстве барабанного типа предусмотрен узел отделения замороженной икры от холодной поверхности, который представляет собой нагретую до температуры $T_{пров}$ натянутую струну, расположенную прямо на поверхности вращающегося барабана перпендикулярно движению икорного продукта. Подводимая от струны теплота $Q_{пр}$ прямо по линии контакта продукта с поверхностью барабана моментально ликвидирует прочное сцепление между ними, практически не влияя на среднеобъемную температуру замороженной икры, что позволяет под действием силы тяжести удалить ее из секции заморозки и направить на дальнейшее хранение посредством любого транспортирующего устройства.

На рис. 2 графически представлено решение адаптированной к объекту исследования математической модели теплопереноса, а именно скорость продвижения фронта T по слою замороженного икорного продукта, меняющая свою величину в зависимости от продолжительности процесса, реализуемого в рабочей камере барабанного морозильного аппарата.

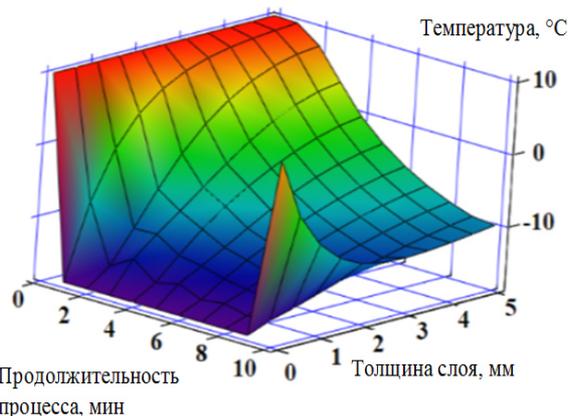


Рис. 2. Скорость продвижения фронта T по толщине слоя продукта во времени при замораживании сазаньей икры

Fig. 2. Rate of moving the front T along the thickness of the product layer in time during the sazan caviar freezing

Из графика видно, что температура поверхностного слоя продукта, контактирующей с охлаждающей рабочей поверхностью барабанного узла, изначально резко снижается до температуры данной поверхности и впоследствии становится равной ей. При этом на последней стадии обозначенной операции температура поверхности продукта начинает повышаться вследствие взаимодействия с нагретой (с целью минимизации адгезии между материалом и рабочей поверхностью установки) струной, предназначенной для съема замороженной продукции. С противоположной открытой поверхности слоя продукта, контактирующей с окружающей средой, при теплообмене путем ее

естественной конвекции температура плавно уменьшается, но с меньшей интенсивностью по сравнению с обратным вариантом, описанным выше. Сделанные выводы с точки зрения теплообмена очевидны и не требуют детального физического пояснения.

Для более наглядного понимания полученных результатов решения математической модели процесса замораживания икры из сазана на рис. 3 показан график варьирования ее среднеобъемной температуры и температур на границах объекта холодильной обработки в зависимости от продолжительности замораживания.

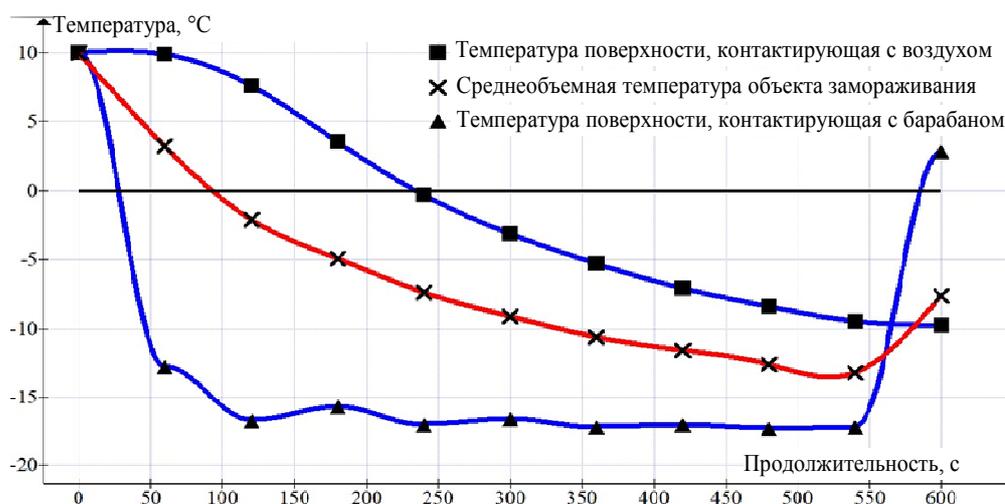


Рис. 3. График изменения среднеобъемной температуры объекта холодильной обработки и температур на его границах в зависимости от времени замораживания

Fig. 3. Graph of changing the average volumetric temperature of the refrigeration object and temperatures at its boundaries depending on the freezing time

В таблице представлены значения температур по толщине объекта заморозки, изменяющихся в зависимости от продолжительности этого про-

цесса, на основании которых построены графики на рис. 2 и 3.

Значения температур по толщине объекта при его замораживании, °C

Temperature values for the thickness of the object when it is frozen, °C

Толщина слоя, мм	Продолжительность замораживания, с										
	0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
0	10	9,906	7,646	3,574	-0,271	-3,089	-5,315	-7,059	-8,395	-9,454	-9,765
0,5	10	9,674	7,295	3,037	-0,78	-3,586	-5,816	-7,555	-8,888	-9,948	-10,20
1,0	10	9,372	6,501	2,023	-0,638	-4,341	-6,542	-8,203	-9,517	-10,54	-10,59
1,5	10	8,934	5,221	0,527	-2,804	-5,371	-7,467	-9,01	-10,27	-11,22	-10,92
2,0	10	8,266	3,37	-1,413	-4,248	-6,68	-8,567	-9,975	-11,14	-11,99	-11,08
2,5	10	7,223	0,835	-3,702	-5,953	-8,251	-9,813	-11,1	-12,10	-12,85	-10,95
3,0	10	5,579	-2,481	-6,192	-7,946	-10,03	-11,18	-12,38	-13,13	-13,81	-10,32
3,5	10	2,98	-6,582	-8,697	-10,30	-11,90	-12,72	-13,75	-14,22	-14,85	-8,854
4,0	10	-1,136	-11,23	-11,11	-13,09	-13,68	-14,52	-15,07	-15,46	-15,87	-6,106
4,5	10	-7,66	-15,66	-13,72	-16,12	-15,35	-16,62	-16,22	-16,96	-16,73	-1,414
5,0	10	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	7

Следует отметить, что в конце процедуры замораживания среднеобъемная температура икры, судя по рис. 3 и данным таблицы, достигла своего рационального значения в $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, при котором икорный продукт может транспортироваться в места хранения. Ниже представлены разработанные рациональные режимные параметры процесса замораживания икорного продукта:

- температура окружающего воздуха – не выше $20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- начальная температура продукта – $10 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура поверхности барабана – не выше $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- толщина замораживаемого слоя – $5 \pm 0,5\text{ мм}$;
- продолжительность замораживания – 10 мин.

Заключение

Построена, адаптирована к икре сазана и решена методом конечных разностей математическая модель внутреннего теплопереноса в процессе замораживания при разнородных граничных услови-

ях. Научная новизна приведенных в статье результатов решения математической модели (как в графической, так и в табулированной интерпретации (см. рис. 2, 3, табл.)), заключается в том, что аналитическая и численная реализация адаптированной к объекту исследования математической модели позволила оценить температурные поля по толщине слоя икры в зависимости от режимных факторов, вида теплоносителя и способа энергоподвода. Отметим, что приведенные результаты не входят в конфликт с известными данными других исследователей, подтверждены экспериментально и, следовательно, могут быть использованы в инженерной практике.

Разработанные режимные параметры замораживания икорного продукта в морозильниках барабанного типа могут успешно использоваться при реализации технологии лецитина из сазаньей икры, т. к. позволяют сохранить в объекте обработки необходимый целевой компонент.

Список источников

1. Добрецкая Е. И. Рынок рыбной продукции в Российской Федерации // Молодой ученый. 2022. № 13. С. 44–47.
2. Колончин К. В., Бетин О. И., Волошин Г. А., Горбунова М. А. Анализ цен рыбной продукции на внутрисельском рынке // Тр. ВНИРО. 2021. Т. 185. С. 113–119. DOI: 10.36038/2307-3497-2021-185-113-119.
3. Вольнова Е. Р., Козырева А. С., Ляшенко А. Е. Различные способы получения лецитина из продуктов растительного и животного сырья // Молодой ученый. 2021. № 17. С. 28–32.
4. Butina E. A., Gerasimenko E. O., Bugaets I. A., Dubrovskaya I. A. Comparative analysis of the physiological value of lecithins obtained from different types of raw materials // Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. 2017. V. 9. N. 12. P. 2493–2497.
5. Попов В. Г., Белина С. А., Федорова О. С. Развитие технологии производства специализированных продуктов питания для населения Арктики // Ползун. вестн. 2017. № 3. С. 14–18.
6. Лисовая Е. В., Викторова Е. П., Лисовой В. В. Анализ ассортимента лецитинов, представленных на российском рынке // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2019. № 2. С. 51–55.
7. Mortensen A., Aguilar F., Crebelli R., Di Domenico A., Jose M. et al. Re-evaluation of lecithins (E 322) as a food additive // EFSA Journal. 2017. V. 15. N. 4. Article e04742. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4742>.
8. Жаркова И. М., Рудаков О. Б., Полянский К. К., Росляков Ю. Ф. Лецитины в технологиях продуктов питания. Воронеж: Изд-во ВГУИТ, 2015. 256 с.
9. Сороко О., Усеня Ю. Анализ способов замораживания пищевых продуктов // Наука и инновации. 2011. Т. 5. № 99. С. 63–67.
10. Еременко В. Т., Орешина М. Н. Методологические аспекты математического моделирования тепло-
- массообменных процессов на примере замораживания термолабильных материалов // Информационные системы и технологии. 2020. Т. 119. № 3. С. 47–55.
11. Ишевский А. Л., Давыдов И. А. Замораживание как метод консервирования пищевых продуктов // Теория и практика переработки мяса. 2017. Т. 2. № 2. С. 43–59.
12. Актершев С. П., Алексеенко С. В., Цвелодуб О. Ю. Теоретическое моделирование гидродинамики и теплопереноса в волновых пленках жидкости при сложных условиях течения (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29. № 1. С. 1–36.
13. Нугманов А. Х. Х., Максименко Ю. А., Алексанян А. И., Алексанян О. А. Исследование физико-химических свойств рыбных фаршей, сухих растительных премиксов и их смесей // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2018. № 2. С. 135–148. DOI: 10.24143/2073-5529-2018-2-135-148.
14. Цирлин А. М. Математические модели и оптимальные процессы в макросистемах. М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. 500 с.
15. Еременко В. Т., Орешина М. Н. Методологические аспекты математического моделирования тепло-массообменных процессов на примере замораживания термолабильных материалов // Информационные системы и технологии. 2020. № 3. С. 47–55.
16. Алексанян И. Ю., Нугманов А. Х. Х., Ярцева Н. В., Худалиев Ю. М., Айсунгуров Н. Д. Моделирование кинетики тепломассопереноса в процессе вакуумного замораживания рыбного фаршевого сырья // Науч. журн. НИУ ИТМО. Сер.: Процессы и аппараты пищевых производств. 2020. № 2. С. 11–21. DOI: 10.17586/2310-1164-2020-10-2-11-21.
17. Попов Н. М. Исследование алгоритма решения дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных разностей // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте: сб. тр. Вологда: Изд-во Волог. гос. ун-та, 2022. С. 236–241.

References

1. Dobretskaya E. I. Rynok rybnoi produktsii v Rossiiskoi Federatsii [Market of fish products in Russian Federation]. *Molodoi uchenyi*, 2022, no. 13, pp. 44-47.
2. Kolonchin K. V., Betin O. I., Voloshin G. A., Gorbunova M. A. Analiz tsen rybnoi produktsii na vnutrorossiiskom rynke [Analysis of fish product prices at national market]. *Trudy VNRO*, 2021, vol. 185, pp. 113-119. DOI: 10.36038/2307-3497-2021-185-113-119.
3. Vol'nova E. R., Kozyreva A. S., Liashenko A. E. Razlichnye sposoby polucheniia letsitina iz produktov rastitel'nogo i zhivotnogo syr'ia [Different methods of obtaining lecithin from products of plant and animal raw materials]. *Molodoi uchenyi*, 2021, no. 17, pp. 28-32.
4. Butina E. A., Gerasimenko E. O., Bugaets I. A., Dubrovskaya I. A. Comparative analysis of the physiological value of lecithins obtained from different types of raw materials. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 2017, vol. 9, no. 12, pp. 2493-2497.
5. Popov V. G., Belina S. A., Fedorova O. S. Razvitiie tekhnologii proizvodstva spetsializirovannykh produktov pitaniia dlia naseleniia Arktiki [Developing technology for production of specialized food products for population in Arctic]. *Polzunovskii vestnik*, 2017, no. 3, pp. 14-18.
6. Lisovaia E. V., Viktorova E. P., Lisovoi V. V. Analiz assortimenta letsitinov, predstavlenykh na rossiiskom rynke [Analysis of range of lecithins presented on Russian market]. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvaiushchei promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniia*, 2019, no. 2, pp. 51-55.
7. Mortensen A., Aguilar F., Crebelli R., Di Domenico A., Jose M. et al. Re-evaluation of lecithins (E 322) as a food additive. *EFSA Journal*, 2017, vol. 15, no. 4, article e04742. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4742>.
8. Zharkova I. M., Rudakov O. B., Polianskii K. K., Rosliakov Iu. F. Letsitiny v tekhnologiiakh produktov pitaniia [Lecithins in food technologies]. Voronezh, Izd-vo VGUIT, 2015. 256 p.
9. Soroko O., Usenia Iu. Analiz sposobov zamorazhivaniia pishchevykh produktov [Analysis of food freezing methods]. *Nauka i innovatsii*, 2011, vol. 5, no. 99, pp. 63-67.
10. Eremenko V. T., Oreshina M. N. Metodologicheskie aspekty matematicheskogo modelirovaniia teplo-massobmennyykh protsessov na primere zamorazhivaniia termolabil'nykh materialov [Methodological aspects of mathematical modeling of heat and mass transfer processes on example of freezing thermolabile materials]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, 2020, vol. 119, no. 3, pp. 47-55.
11. Ishevskii A. L., Davydov I. A. Zamorazhivanie kak metod konservirovaniia pishchevykh produktov [Freezing as method of food preservation]. *Teoriia i praktika pererabotki miasa*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 43-59.
12. Aktershev S. P., Alekseenko S. V., Tselodub O. Iu. Teoreticheskoe modelirovanie gidrodinamiki i teploperenosa v volnovykh plenkach zhidkosti pri slozhnykh usloviiahk techeniia (obzor) [Theoretical modeling of hydrodynamics and heat transfer in wave fluid films under complex flow conditions (review)]. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 1-36.
13. Nugmanov A. Kh. Kh., Maksimenko Iu. A., Aleksanian A. I., Aleksanian O. A. Issledovanie fiziko-khimicheskikh svoistv rybnykh farshei, sukhikh rastitel'nykh premiksov i ikh smesei [Studying physicochemical properties of minced fish, dry vegetable premixes and their mixtures]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo*, 2018, no. 2, pp. 135-148. DOI: 10.24143/2073-5529-2018-2-135-148.
14. Tsirlin A. M. *Matematicheskie modeli i optimal'nye protsessy v makrosistemakh* [Mathematical models and optimal processes in macrosystems]. Moscow-Berlin, Direkt-Media Publ., 2015. 500 p.
15. Eremenko V. T., Oreshina M. N. Metodologicheskie aspekty matematicheskogo modelirovaniia teplo-massobmennyykh protsessov na primere zamorazhivaniia termolabil'nykh materialov [Methodological aspects of mathematical modeling of heat and mass transfer processes on example of freezing thermolabile materials]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, 2020, no. 3, pp. 47-55.
16. Aleksanian I. Iu., Nugmanov A. Kh. Kh., Iartseva N. V., Khudaliev Iu. M., Aisungurov N. D. Modelirovanie kinetiki teplomassoperenosa v protsesse vakuumnogo zamorazhivaniia rybnogo farshevogo syr'ia [Modeling kinetics of heat and mass transfer in vacuum freezing of minced fish raw materials]. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*, 2020, no. 2, pp. 11-21. DOI: 10.17586/2310-1164-2020-10-2-11-21.
17. Popov N. M. Issledovanie algoritma resheniia differentsial'nogo uravneniia teploprovodnosti metodom konechnykh raznostei [Investigation of algorithm for solving differential equation of heat conduction by method of finite differences]. *Avtomatizatsiia i energoberezhenie v mashinostroenii, energetike i na transporte: sbornik trudov*. Volgodga, Izd-vo Volog. gos. un-ta, 2022. Pp. 236-241.

Статья поступила в редакцию 16.11.2022; одобрена после рецензирования 19.01.2023; принята к публикации 16.03.2023
The article is submitted 16.11.2022; approved after reviewing 19.01.2023; accepted for publication 16.03.2023

Информация об авторах / Information about the authors

Виолетта Эдуардовна Поликарпова – аспирант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; polikarpova.violetta@yandex.ru

Violetta E. Polikarpova – Postgraduate Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; polikarpova.violetta@yandex.ru

Игорь Юрьевич Алексанян – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; 16081960igor@gmail.com

Зарема Михайловна Арабова – кандидат технических наук; младший научный сотрудник лаборатории пищевой системы; Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского; zarema.polymer@gmail.com

Екатерина Валерьевна Фоменко – кандидат технических наук; доцент кафедры экономики и управления предприятием; Астраханский государственный технический университет; tetatet.78@mail.ru

Альберт Хамед-Харисович Нугманов – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; albert909@yandex.ru

Лина Юрьевна Лагуткина – доктор сельскохозяйственных наук, кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры аквакультуры и рыболовства; Астраханский государственный технический университет; lagutkina_lina@mail.ru

Igor Yu. Aleksanyan – Doctor of Sciences in Technology, Professor; Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; 16081960igor@gmail.com

Zarema M. Arabova – Candidate of Sciences in Technology; Junior Researcher of the Laboratory of Food System; Vernadsky Institute of Geo-Chemistry and Analytical Chemistry; zarema.polymer@gmail.com

Ekaterina V. Fomenko – Candidate of Sciences in Technology; Assistant Professor of the Department of Economics and Enterprise Management; Astrakhan State Technical University; tetatet.78@mail.ru

Albert Kh.-Kh. Nugmanov – Doctor of Sciences in Technology, Professor; Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; albert909@yandex.ru

Lina Yu. Lagutkina – Doctor of Sciences in Agriculture, Candidate of Sciences in Biology, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Aquaculture and Fisheries; Astrakhan State Technical University; lagutkina_lina@mail.ru

