

Научная статья
УДК 664.951
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-1-123-135>
EDN DHOHPS

Расчет режимов релаксации обезвоженного поверхностного слоя путассу в процессе сушки

М. А. Ершов¹, *Л. К. Куранова²*,
В. В. Ерещенко³, *И. В. Смирнова⁴*, *Ю. В. Живлянцева⁵*

¹⁻⁴*Мурманский арктический университет,
Мурманск, Россия, ershovma@mstu.edu.ru*

⁵*Мурманский филиал ФГБУ «Национальный центр безопасности продукции
водного промысла и аквакультуры»,
Мурманск, Россия*

Аннотация. При холодной сушке рыбы поверхностные слои, потерявшие значительную часть воды, уплотняются и препятствуют диффузии воды из внутренних слоев рыбы к поверхности. В целях восстановления диффузионных свойств поверхностного слоя рыбы необходимо создать условия для перераспределения влаги по толщине объекта, например временно ограничить внешний массоперенос. Для этого снижают температуру, скорость движения воздуха в сушильной камере и повышают его относительную влажность. За счет диффузии вода из центральных слоев рыбы будет поступать к обезвоженному поверхностному слою и увлажнять его. В итоге массопроводные свойства поверхностного слоя будут повышаться. Цель данной работы – изучение влияния процессов релаксации на изменение толщины обезвоженного поверхностного слоя рыбы для последующей разработки научно обоснованных рациональных режимов сушки. Расчет перераспределения влаги осуществлялся при условии (допущении), что внешний массоперенос влаги с поверхности объекта обработки отсутствует. Произведено построение кривой кинетики и кривых распределения воды в объекте обработки при производстве вяленой рыбной продукции через 2; 2,5; 13,5; 55 ч соответственно. Средняя влажность путассу после обезвоживания продолжительностью 2 ч составляла 333 % в пересчете на сухое вещество. Толщина обезвоженного слоя $S = 1,6$ мм. Через 1,5 ч релаксации влажность на поверхности рыбы увеличилась с 272 до 330 % и приблизилась к средней влажности образца. При обезвоживании рыбы продолжительностью 13,5 ч средняя влажность образца в расчете на сухую массу составила 217 %, толщина обезвоженного поверхностного слоя $S = 0,9$ мм. Через 2,5 ч релаксации влажность на поверхности слоя составила 174 %. Установлено, что в начале процесса сушки сухой обезвоженный слой имеет положительную тенденцию к восстановлению потерянных влагопроводных (диффузионных) свойств, но в конце процесса сушки для их восстановления требуется больше времени. Предложен метод расчета релаксационных кривых, который может применяться для исследования процессов перераспределения влаги в объекте обработки с целью создания рациональных режимов сушки.

Ключевые слова: процесс сушки, влажность, обезвоживание, рыба, путассу, релаксация обезвоженного слоя, сухое вещество, поверхностный слой, перераспределение влаги

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-20116, <https://rscf.ru/project/22-26-20116/>; за счет гранта Министерства образования и науки Мурманской области (далее – Министерство) по направлению «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами», на основании Соглашения № 103 от 13 апреля 2022 г. между Министерством и ФГАОУ ВО «МГТУ».

Для цитирования: *Ершов М. А., Куранова Л. К., Ерещенко В. В., Смирнова И. В., Живлянцева Ю. В.* Расчет режимов релаксации обезвоженного поверхностного слоя путассу в процессе сушки // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2024. № 1. С. 123–135. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-1-123-135>. EDN DHOHPS.

Original article

Calculation of relaxation modes of the dehydrated surface layer of the whiting during the drying process

M. A. Ershov^{1✉}, L. K. Kuranova²,
V. V. Ereshchenko³, I. V. Smirnova⁴, Iu. V. Zhivlyantseva⁵

¹⁻⁴Murmansk Arctic University,
Murmansk, Russia, ershovma@mstu.edu.ru✉

⁵Murmansk Branch Federal State Budgetary Institution
“National Center for the Safety of Aquatic Products and Aquaculture”,
Murmansk, Russia

Abstract. During cold drying of fish, the surface layers, which have lost a significant part of the water, become compacted and prevent the diffusion of water from the inner layers of the fish to the surface. In order to restore the diffusion properties of the surface layer of fish, it is necessary to create conditions for the redistribution of moisture along the thickness of the object, for example, temporarily limit external mass transfer. To do this, reduce the temperature, the speed of air movement in the drying chamber and increase its relative humidity. Due to diffusion, water from the central layers of the fish will flow to the dehydrated surface layer and moisten it. As a result, the mass-conducting properties of the surface layer will increase. The purpose of this work is to study the effect of relaxation processes on changes in the thickness of the dehydrated surface layer of fish for the subsequent development of scientifically sound rational drying regimes. The calculation of moisture redistribution in this work was carried out under the condition (assumption) that there is no external mass transfer of moisture from the surface of the processing object. The kinetics curve and water distribution curves in the processing facility were constructed during the production of dried fish products in 2; 2.5; 13.5; 55 hours respectively. The average humidity of the whiting after dehydration lasting 2 hours was 333% in terms of dry matter. The thickness of the dehydrated layer $S = 1.6$ mm. After 1.5 hours of relaxation, the moisture on the surface of the fish increased from 272 to 330% and approached the average humidity of the sample. During dehydration of fish lasting 13.5 hours, the average moisture content of the sample per dry mass was 217%, the thickness of the dehydrated surface layer $S = 0.9$ mm. After 2.5 hours of relaxation, the moisture content on the surface of the layer was 174%. It was found that at the beginning of the drying process, the dry dehydrated layer has a positive tendency to restore the lost moisture-conducting (diffusion) properties, but at the end of the drying process it takes more time to restore them. The paper proposes a method for calculating relaxation curves, which can be used to study the processes of moisture redistribution in the processing object in order to create rational drying modes.

Keywords: drying process, humidity, dehydration, fish, whiting, relaxation of the dehydrated layer, dry matter, surface layer, moisture redistribution

Acknowledgment: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-26-20116, <https://rscf.ru/project/22-26-20116/>; at the expense of a grant from the Ministry of Education and Science of the Murmansk Region (hereinafter referred to as the Ministry) in the direction of “Conducting basic scientific research and exploratory scientific research by small individual scientific groups”, on the basis of Agreement No. 103 dated April 13, 2022 between the Ministersstv and FGAOU IN “MGTU”.

For citation: Ershov M. A., Kuranova L. K., Ereshchenko V. V., Smirnova I. V., Zhivlyantseva Iu. V. Calculation of relaxation modes of the dehydrated surface layer of the whiting during the drying process. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry.* 2024;1:123-135. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-1-123-135>. EDN DHOHPS.

Введение

Согласно «Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 г. и плана мероприятий по ее реализации» [1], тресковые виды рыбы являются одним из основных видов рыбных ресурсов и обладают высоким потенциалом глобального рыночного спроса. В данном документе изложены плановые показатели, среди которых особый интерес представляет увеличение инвестирования средств в рыбодобывающую и рыбоперерабатывающую отрасли, а также повышение доли рынка в сегменте переработки рыб семейства

тресковых. При этом одним из перспективных направлений производства является изготовление сушеной, вяленой и соленой рыбной продукции (клипфиска) [1]. Также в данном документе указано, что одним из приоритетов рыбохозяйственной отрасли должно быть повышение энергоэффективности технологических процессов в рамках проекта комплексного развития данной сферы производства [1, 2].

Вяление – традиционный способ получения продукции, пользующейся повышенным спросом. Однако изменение сырьевой базы, достаточно вы-

сокая энергоемкость и длительность процесса вяления, высокие требования к качеству выпускаемой продукции вынуждают искать пути совершенствования технологии и контроля производства [3]. Особый интерес, по мнению исследователей, представляет конвективная сушка при низких температурах, т. к. при этом можно получить продукцию наиболее высокого качества, поскольку при данных температурах нежелательные реакции, такие как окислительные процессы липидов, деструкция белков, происходят наименее активно [4–6].

Для внедрения в производство новых технологий обезвоживания необходимы технические решения, позволяющие интенсифицировать процесс сушки рыбы, сократить энергетические затраты на производство и увеличить выпуск при улучшении качества вяленой продукции. Данных результатов невозможно достичь без теоретического и экспериментального исследования тепло-массообменных процессов, происходящих в объектах, которые обладают лабильными свойствами [7, 8].

Известно, что при конвективной сушке рыбы по достижении содержания общей влаги в ней 55–60 % процесс обезвоживания значительно замедляется. Длительность первого периода сушки, протекающего с постоянной скоростью, относительно времени всего процесса обезвоживания достаточно мала [9, 10]. Изучение кинетики сушки имеет важное значение при решении вопросов интенсификации данных процессов, т. к. это позволяет оценивать скорость обезвоживания в первый и второй периоды сушки при различных режимных параметрах процесса [10, 11]. Установлено, что в процессе сушки на поверхности рыбы формируется уплотненный слой, препятствующий диффузии влаги из продукта [9], при этом оставшаяся влага в основном сосредотачивается в центре образца, и от центра к поверхности формируется градиент влажности. В итоге внешний обезвоженный слой образует изоляционный барьер, препятствующий отводу влаги из продукта. Замедление скорости сушки также связано с тем, что вода, оставшаяся в центре объекта, проходит более длительный путь к поверхности, чем приповерхностная вода в начале сушки [6, 8, 12, 13].

Для обеспечения эффективности обезвоживания сырья животного и растительного происхождения технологические параметры необходимо менять в зависимости от стадии процесса обезвоживания и, кроме этого, требуется учитывать внутренние свойства обрабатываемого сырья [14]. Например, в работе А. Ключникова [7] рассмотрена кинетика сушки продукции растительного происхождения при конвективном низкотемпературном многостадийном способе, определены этапы сушки и оптимальные параметры процесса, отмечено положительное влияние низких температур на состояние конечного продукта.

Для исследования процессов обезвоживания пищевых продуктов создаются имитационные матема-

тические модели, которые могут использоваться для изучения распределения температуры и влажности в объекте обработки и других параметров, например усадки [12]. Применение математических моделей также позволяет проектировать, оценивать производительность сушильного оборудования, а также управлять процессом и оптимизировать его [15–17]. При моделировании изменения влагосодержания по толщине рыбы в процессе сушки поиск аналитических решений крайне затруднен, т. к. коэффициент массопереноса является, в свою очередь, функцией влагосодержания [18, 19]. Установлено, что при обезвоживании коэффициент массопереноса (диффузии влаги) может уменьшаться в несколько раз, т. к. функционально связан с содержанием воды в рыбе [18]. Этот факт необходимо учитывать при моделировании процессов холодной сушки рыбы. По нашему мнению, моделирование конвекционных процессов обезвоживания может быть выполнено на основе обобщенных зависимостей.

Обобщение экспериментальных зависимостей кинетики обезвоживания провесной и вяленой рыбы проводилось на основе безразмерных чисел подобия [20]. Применение обобщенных зависимостей дает возможность использовать математические выражения для расчета коэффициентов массопереноса в зависимости от текущей влажности рыбы. Это позволяет моделировать изменение влажности по толщине объекта сушки для всего процесса. На основании литературного обзора по тематике исследования можно сделать вывод, что при моделировании процессов обезвоживания пищевых продуктов необходимо учитывать изменчивость диффузионных свойств и наличие усадки обрабатываемого сырья [9]. Моделирование процессов обезвоживания с учетом усадки обрабатываемого сырья дает более точные результаты [12]. Для построения расчетной кривой кинетики обезвоживания и последующего построения кривых распределения влаги по толщине объекта с целью изучения релаксационных процессов принято решение воспользоваться методикой, представленной ранее в работе [20]. Релаксация – это процесс перераспределения влаги в объекте обработки, который применяется с целью повышения влагопроводных свойств обезвоженного поверхностного слоя рыбы. При этом необходимо создать условия для перераспределения влаги по толщине объекта, например временно ограничить внешний массоперенос. Для этого снижают температуру, скорость движения воздуха в сушильной камере и повышают его относительную влажность. За счет диффузии вода из центральных слоев рыбы будет поступать к обезвоженному поверхностному слою и увлажнять его. В итоге массопроводные свойства поверхностного слоя будут повышаться. Релаксация способствует более эффективному дальнейшему процессу обезвоживания за счет увлажнения поверхностного слоя рыбы влагой центральных слоев. Представленная в работе [20] методика поз-

воляет строить кривые кинетики обезвоживания и находить расчетные кривые распределения воды в рыбе с учетом изменения диффузионных свойств объекта, а также учитывает начальную влажность рыбы, геометрические размеры и параметры (температура, относительная влажность воздуха) технологического процесса при скорости потока теплоносителя от 2 до 3 м/с.

Цель данной работы – изучение влияния процессов перераспределения влаги (релаксации) на изменение толщины обезвоженного поверхностного слоя рыбы для последующей разработки научно обоснованных рациональных режимов сушки.

Задачи исследования:

- произвести расчет распределения влаги по толщине рыбы в процессе холодной сушки;
- осуществить расчет процессов перераспределения воды внутри рыбы при релаксации в различные моменты времени;
- определить расчетным и экспериментальным путем значения толщины сухого поверхностного слоя рыбы.

Материалы и методы

Объект исследования – путассу северная *Micromesistius poutassou* (A. Risso, 1827).

Начальная влажность путассу $w_0 = 79,4$ %. Удельная поверхность путассу $s / m = 0,17$ м²/кг, где s – площадь рыбы, м²; m – масса рыбы, кг.

Параметры воздуха в сушильной камере при обезвоживании: температура $t_b = 27,5$ °С; относительная влажность $\varphi = 20,3$ %; скорость движения $v = 2$ м/с.

Определение массовой доли воды выполнялось согласно ГОСТ 7636-85 [21].

Плотность структуры (твердость) обезвоженного поверхностного слоя определялась по показателю «Усилие резания» на прочностном измерителе Food Checker (Япония), инвертор – нож.

Для построения экспериментальных кривых кинетики обезвоживания определялась влажность рыбы в расчете на сухую массу w_i^c %, в соответствующие моменты времени по формуле

$$w_i^c = \left(\frac{m_i}{m_c} - 1 \right) \cdot 100, \quad (1)$$

где m_i – масса рыбы в определенный момент времени, кг; m_c – масса сухого вещества в рыбе, кг.

Расчет массы сухого вещества в рыбе:

$$m_c = m_0 \cdot \left(1 - \frac{w_0^0}{100} \right), \quad (2)$$

где m_0 – масса рыбы в начальный момент времени, кг; w_0^0 – начальная влажность рыбы на общую массу, %.

Построение кривых распределения влаги по толщине рыбы осуществлялось с помощью численных методов расчета [20], которые базируются на реше-

нии дифференциального уравнения в частных производных диффузионного типа, например для одномерного (по пространству) дифференциального уравнения в частных производных [14]:

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = a_m \cdot \frac{\partial^2 w^c}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где $\frac{\partial w^c}{\partial \tau}$ – изменение влажности в пересчете на сухое вещество w^c в единицу времени τ ; a_m – коэффициент диффузии влаги; $\frac{\partial^2 w^c}{\partial x^2}$ – изменение градиента влажности; x – пространственная координата.

Построение релаксационных кривых производилось на основе решения дифференциального уравнения влагопереноса с граничными условиями третьего рода [22]:

$$\theta_{(x, \tau)} = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\mu_i^2 Fo} \cdot \cos(\mu_i x / R), \quad (4)$$

где $\theta_{(x, \tau)}$ – безразмерная влажность рыбы на расстоянии от центра пластины x для момента времени τ ; n – количество равноотстоящих точек на той или иной части кривой динамики релаксации ($n = 4-7$); A_i – постоянный коэффициент, свой для каждого члена ряда (не зависящий ни от координат, ни от времени τ); μ_i – корни характеристического уравнения; Fo – критерий Фурье, $Fo = D\tau / R^2$, где D – коэффициент диффузии влаги; R – полутолщина рыбы.

Расчет влажности левой части релаксационной кривой относительно точки A производился по формуле [22]

$$\theta_{(x, \tau)} = \frac{w'_j - w_{(x, \tau)}}{w'_j - w'_{(j-1)}}, \quad (5)$$

где w'_j – значение влажности в точках поворота релаксационных кривых, $j = 0$ – для начальной, $j = 1$ – первой, ..., $j = n$ – последней релаксационной кривой; $w_{(x, \tau)}$ – искомая влажность рыбы на расстоянии от центра пластины x для момента времени τ ; $w'_{(j-1)}$ – влажность рыбы в соответствующей точке предыдущей релаксационной кривой.

Расчет влажности правой части релаксационной кривой относительно точки A производился по формуле [22]

$$\theta_{(x, \tau)} = \frac{w_{(x, \tau)} - w'_j}{w'_{(j-1)} - w'_j}. \quad (6)$$

Результаты исследования

При холодной сушке рыбы, согласно технологическим инструкциям, необходимо делать перерывы в процессе обезвоживания. Это нужно для перерас-

пределения воды по толщине объекта тепловой обработки. Дело в том, что при температурах сушильного агента менее 40 °С интенсивность внешнего массообмена превышает интенсивность внутреннего массопереноса. При обезвоживании поверхностные слои, потерявшие значительную часть воды, уплотняются и препятствуют диффузии воды из внутренних слоев рыбы к поверхности. Установлено, что коэффициенты диффузии воды в значительной степени зависят от содержания воды в рыбе. Данные коэффициенты могут уменьшаться в несколько раз по мере сушки сырья. Для восстановления диффузионных свойств поверхностного слоя рыбы применяют специальные технологические режимы для перераспределения влаги по толщине объекта. Это позволяет более рационально исполь-

зовать теплоноситель (подготовленный воздух, дымовоздушную смесь) и снизить затраты электрической энергии на процесс сушки. Для создания условий для перераспределения влаги в толще объекта необходимо на время снизить внешний массоперенос, например прекратить подачу сушильного агента в камеру или снизить температуру, скорость движения теплоносителя и повысить его относительную влажность. Однако изменение влагосодержания по толщине рыбы в процессах релаксации влаги без воздействия сушильного агента определить расчетным путем достаточно сложно. Хотя задача решается, если использовать кинетические зависимости, определенные ранее [22], а затем рассчитать и построить кривые динамики распределения влаги (рис. 1).

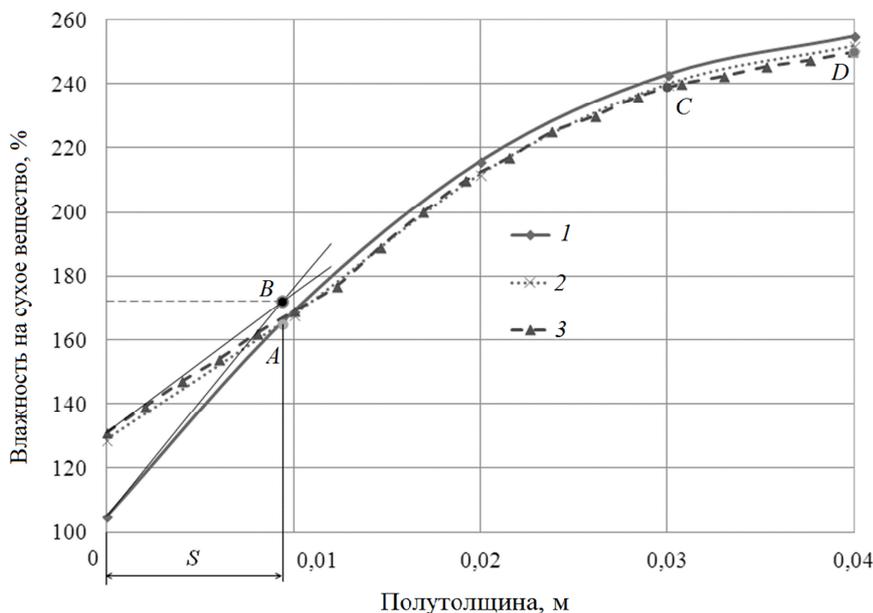


Рис. 1. Кривые распределения влаги по толщине рыбы: 1 – начало процесса релаксации – расчет методом сеток на основе решения уравнения (3) [20]; 2 – продолжительность релаксации 0,5 ч – расчет методом сеток на основе решения уравнения (3); 3 – продолжительность релаксации 0,5 ч – расчет с помощью уравнений (4)–(6); A – точка пересечения кривых 1 и 2; B – точка пересечения касательных к кривым 1 и 2; точки C и D характеризуют различие кривых 2 и 3; S – толщина зоны релаксации

Fig. 1. Curves of the dynamics of moisture relaxation in fish: 1 – the beginning of the relaxation process – calculation by the grid method based on the solution of equation (3) [20]; 2 – relaxation time 0.5 hours – calculation by the grid method based on the solution of equation (3); 3 – relaxation time 0.5 hours – calculation using equations (4)–(6); Point A is the point of intersection of curves 1 and 2; Point B is the point of intersection of the tangents to curves 1 and 2; Points C and D characterize the difference between curves 2 and 3; S is the thickness of the relaxation zone

Кривая 1 отображает распределение влаги по толщине рыбы в момент прекращения подачи сушильного агента. Кривые 1–3 пересекаются в точке A, которую назвали точкой поворота левой и правой части кривых. Релаксационные кривые 2, 3 в левой и правой части от точки A практически совпали. Отклонение одной кривой от другой в правой части от точки A составило менее 1 %. Толщина

зоны релаксации S характеризует толщину слоя с низкими теплопроводными свойствами.

Таким образом, можно заключить, что расчет кривых динамики релаксации следует вести двумя методами: в начале релаксации расчет ведут численным методом, кривая 1 (см. рис. 1). После построения методом сеток кривой 1 расчет продолжают, используя уравнения (4)–(6). Если расчет про-

цесса релаксации вести, используя только численные методы, то в дальнейшем при продолжительности релаксации более получаса расчетные релаксационные кривые будут существенно отличаться от таковых, полученных путем эксперимента.

Рассмотрим на конкретном примере изменение влагопроводных свойств при сушке рыбы.

На рис. 2 представлены экспериментальная и расчетная кривые кинетики обезвоживания путассу.

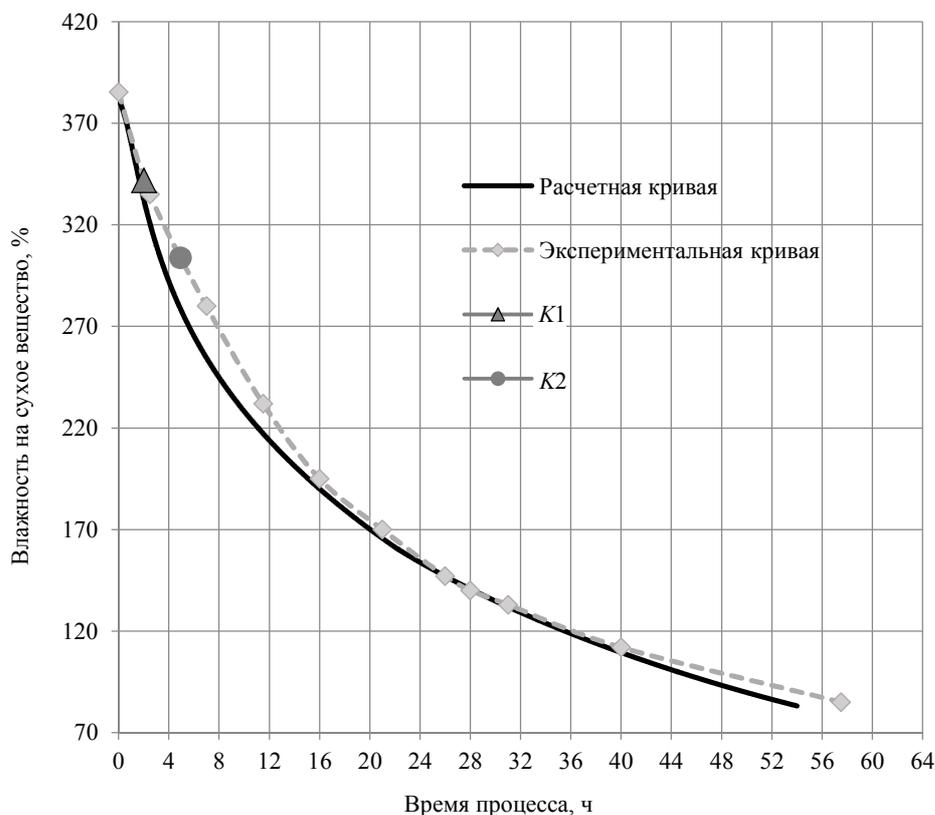


Рис. 2. Кривые кинетики обезвоживания путассу: K_1 – критическая точка, характеризующая завершение первого периода обезвоживания, когда скорость сушки максимальна, данной точке соответствует влажность рыбы w_{K1} ; K_2 – критическая точка, характеризующая существенное замедление скорости обезвоживания, которое связано с изменением диффузионных свойств объекта сушки, данной точке соответствует влажность рыбы w_{K2}

Fig. 2. Curves of blue whiting dehydration kinetics: K_1 is a critical point characterizing the completion of the first dehydration period, when the drying rate is maximum, this point corresponds to the fish moisture content w_{K1} ;

K_2 is a critical point characterizing a significant slowdown in the dehydration rate, which is connected with a change in the diffusion properties of the drying object, this point corresponds to the moisture content of the fish w_{K2}

Для построения экспериментальной кривой использовались формулы (1) и (2). Для построения расчетной кривой применялась методика, представленная в работе [23]. На кривой кинетики обезвоживания путассу отмечены две критических точки, K_1 и K_2 .

Критические точки (K_1 и K_2) характеризуют переход к удалению влаги, имеющей, соответственно, меньшую и большую энергии связи влаги с материалом [14]. При достижении на кривой кинетики обезвоживания второй критической влажности w_{K2} скорость удаления влаги значительно снижается. Это происходит из-за ухудшения влагопроводных

свойств рыбы. По мере высушивания происходит усадка поверхностных слоев рыбы, в результате чего уменьшаются размеры капилляров. Это является основной причиной замедления скорости обезвоживания. Если влагопроводные свойства восстановить, то можно снизить затраты энергии на процессы копчения, вяления и сушки рыбы. На экспериментальной кривой сушки точка K_2 возникла через 5 ч обезвоживания.

На рис. 3 представлены графики кривых распределения влаги по толщине (релаксации) после двухчасового обезвоживания путассу.

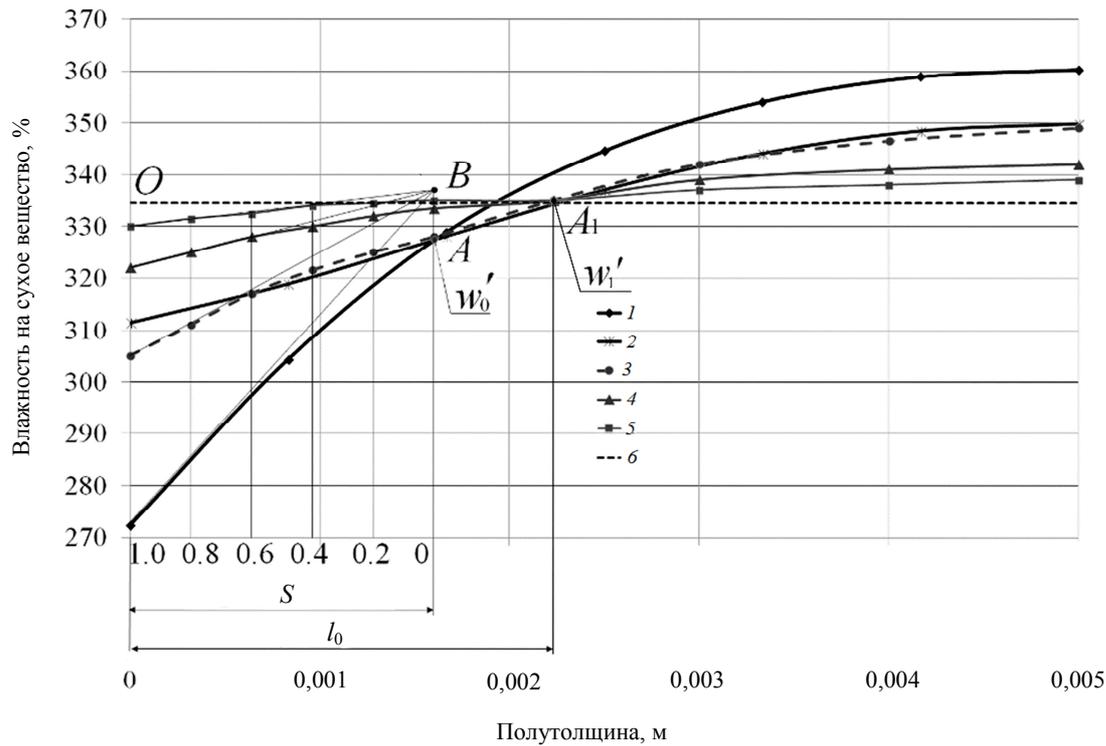


Рис. 3. Кривые распределения влаги по толщине рыбы после двухчасового обезвоживания:
 1 – начало процесса релаксации – расчет методом сеток на основе решения уравнения (3) [20];
 2 – релаксация 0,5 ч – расчет методом сеток на основе решения уравнения (3) [20];
 3, 4, 5 – релаксация 0,5; 1,0; 1,5 ч соответственно, расчет с помощью уравнений (4)–(6);
 6 – средняя влажность рыбы; A – точка поворота кривых динамики релаксации;
 A₁ – смещение точки поворота кривых динамики релаксации; B – точка пересечения
 касательных к релаксационным кривым; O – значение средней влажности рыбы;
 l₀ – толщина слоя после релаксации; w₀' – влажность рыбы в точке поворота начальной релаксационной кривой;
 w₁' – влажность рыбы в точке поворота следующей релаксационной кривой

Fig. 3. Moisture distribution curves across fish thickness after two-hour dehydration:
 1 – the beginning of the relaxation process – calculation by the grid method based on the solution of equation (3) [20];
 2 – relaxation for 0.5 hours – calculation by the grid method based on the solution of equation (3) [20];
 3, 4, 5 – relaxation for 0.5, 1.0, 1.5 hours, respectively, calculation using equations (4)–(6);
 6 – average moisture content of fish; A is the turning point of the relaxation dynamics curves;
 A₁ – shift of the turning point of the relaxation dynamics curves; B is the point of intersection of the tangents
 to the relaxation curves; O – the value of the average moisture content of the fish;
 l₀ – layer thickness after relaxation; w₀' – fish moisture at the turning point of the initial relaxation curve;
 w₁' – the moisture content of the fish at the turning point of the next relaxation curve

Средняя влажность путассу после двухчасового обезвоживания была достаточно высокой и составляла 333 %. Однако, несмотря на высокое среднее влагосодержание, на поверхности рыбы образовался достаточно обезвоженный слой толщиной S = 1,6 мм. После полуторачасовой релаксации влажность на поверхности рыбы увеличилась с 272 до 330 %.

В левой и правой частях образца релаксационная кривая достаточно близко расположилась к линии, отражающей среднюю влажность образца в момент завершения процесса релаксации влаги в нем.

Точка A характеризует положение точки поворо-

та кривых динамики релаксации (см. рис. 3). По мере дальнейшей релаксации точка поворота перемещается вправо и вверх (точка A₁). Влажность рыбы в точке A₁ через 1,5 ч релаксации выше, чем среднеобъемная влажность образца в момент начала релаксации (линия среднеобъемной влажности), что совершенно логично, т. к. повышение влажности в левой части образца происходит за счет притока влаги из его правой части, в которой влажность выше. Значения w₀' и w₁' в уравнениях (5), (6) находят по оси ординат в точках A и A₁ (см. рис. 3).

В процессе релаксации влаги сухой слой увлажняется и его граница перемещается вправо до точки A_1 или далее, пока влажность в образце не выровняется до среднеобъемной влажности (см. рис. 3). В начале релаксации толщина сухого слоя составляла $S = 1,60$ мм. По мере развития релаксационного процесса толщина слоя возросла до $l_0 = 2,23$ мм. Увеличение толщины обезвоженного поверхностно-

го слоя сопровождается и частичным восстановлением влагопроводных свойств рыбы.

Увеличение продолжительности обезвоживания перед релаксацией на 0,5 ч мало повлияло на интенсивность увлажнения сухого слоя в период релаксации. Его толщина S составила 1,45 мм, а $l_0 = 2,20$ мм (рис. 4).

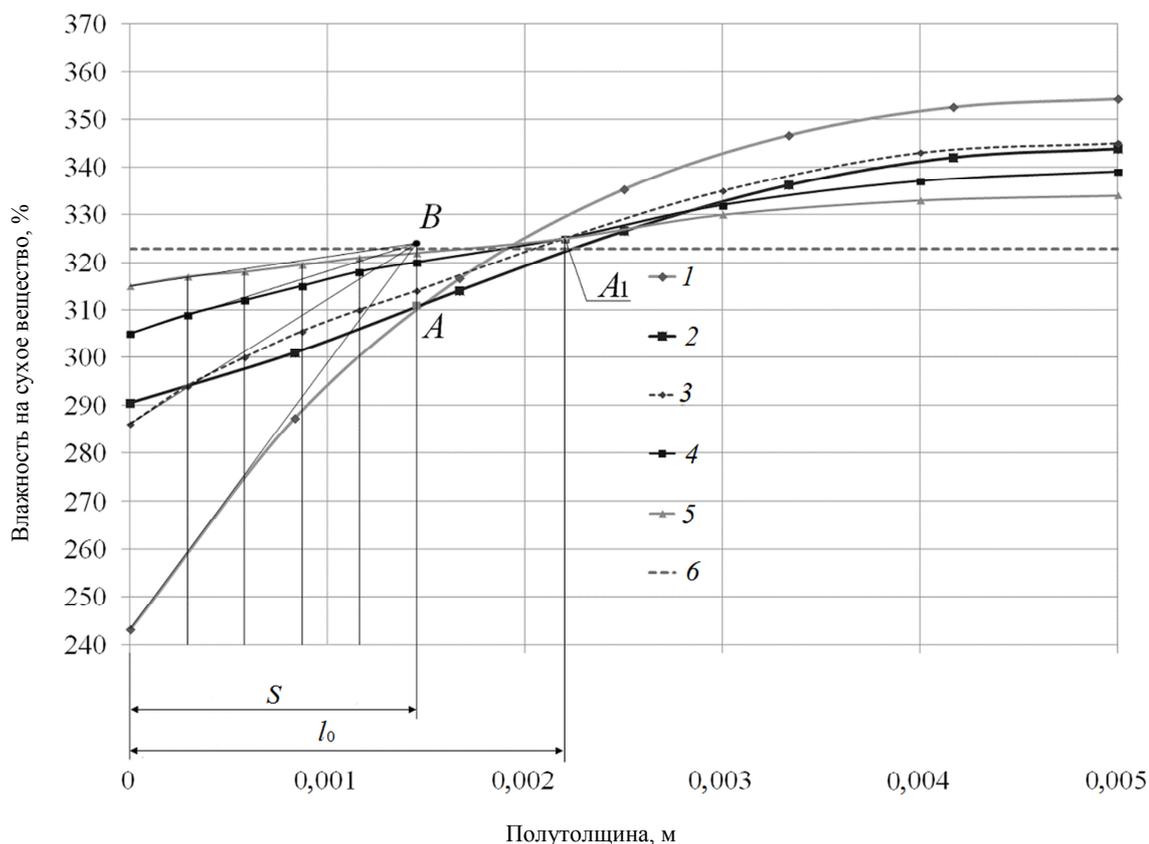


Рис. 4. Кривые распределения влаги по толщине рыбы после обезвоживания 2,5 ч:
1 – начало процесса релаксации – расчет методом сеток на основе решения уравнения (3) [20];
2 – релаксация 0,5 ч – расчет методом сеток на основе решения уравнения (3) [20];
3, 4, 5 – релаксация 0,5; 1,0; 1,5 ч соответственно – расчет с помощью уравнений (4)–(6);
6 – средняя влажность рыбы; A – точка поворота кривых динамики релаксации;
 A_1 – смещение точки поворота кривых динамики релаксации;
B – точка пересечения касательных к релаксационным кривым

Fig. 4. Curves of moisture distribution across the thickness of fish after dehydration for 2.5 hours:
1 – the beginning of the relaxation process – calculation by the grid method based on the solution of equation (3) [20];
2 – relaxation for 0.5 hours – calculation by the grid method based on the solution of equation (3) [20];
3, 4, 5 – relaxation for 0.5, 1.0, 1.5 hours, respectively – calculation using equations (4)–(6);
6 – average moisture content of fish; A is the turning point of the relaxation dynamics curves;
 A_1 – shift of the turning point of the relaxation dynamics curves;
B is the point of intersection of the tangents to the relaxation curves

Однако при обезвоживании рыбы перед релаксацией в течение 13,5 ч точка поворота кривых

динамики релаксации постепенно перемещается влево (рис. 5).

Ершов М. А., Куранова Л. К., Ерепенко В. В., Смирнова И. В., Живлянцева Ю. В. Расчет режимов релаксации обезвоженного поверхностного слоя путассу в процессе сушки

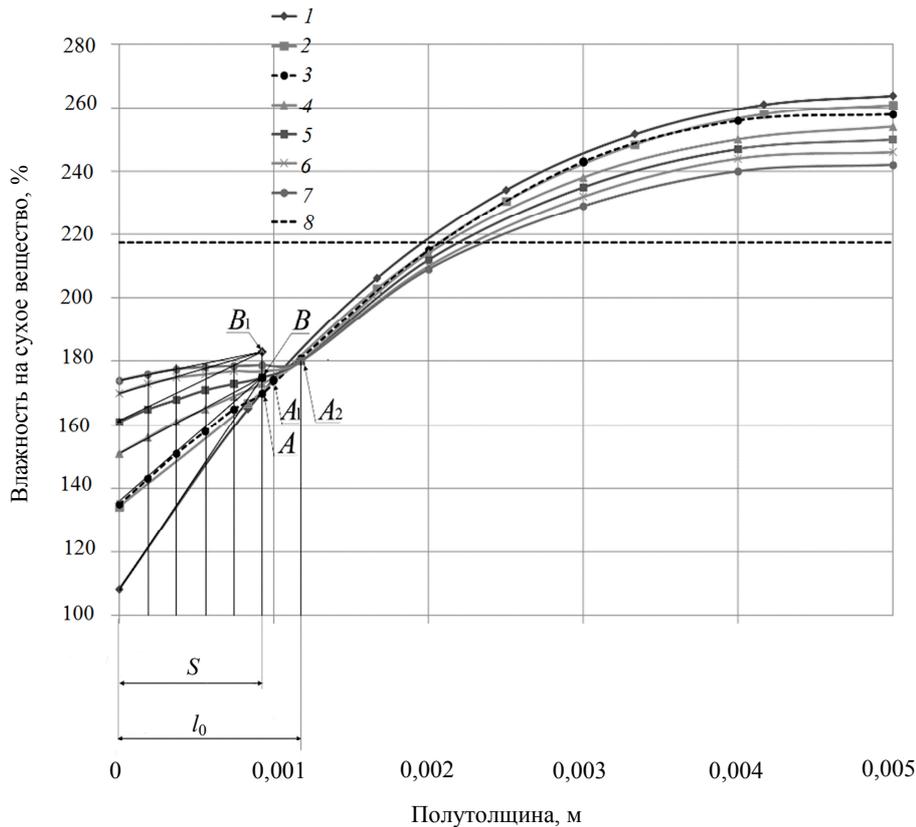


Рис. 5. Кривые распределения влаги по толщине после обезвоживания 13,5 ч: 1 – начало процесса релаксации – расчет методом сеток по уравнению (3); 2 – релаксация 0,5 ч – расчет методом сеток по уравнению (3); 3, 4, 5, 6, 7 – релаксация 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 ч соответственно, расчет с помощью уравнений (4)–(6); 8 – средняя влажность рыбы; A – точка поворота кривых динамики релаксации; A_1, A_2 – смещение точек поворота кривых динамики релаксации (точка A_2 смещается далее вправо на релаксационной кривой при увеличении времени релаксации); B – точка пересечения касательных к релаксационным кривым; B_1 – точка пересечения касательных к релаксационным кривым при дальнейшем увеличении времени релаксации

Fig. 5. Moisture distribution curves by thickness after dehydration for 13.5 hours:
 1 – the beginning of the relaxation process – calculation by the grid method according to equation (3);
 2 – relaxation for 0.5 hours - calculation by the grid method according to equation (3);
 3, 4, 5, 6, 7 – relaxation for 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 hours, respectively, calculation using equations (4)–(6); 8 – average moisture content of fish; A is the turning point of the relaxation dynamics curves;
 A_1, A_2 – displacement of the turning point of the relaxation dynamics curves (point A_2 shifts further to the right on the relaxation curve as the relaxation time increases); B is the point of intersection of the tangents to the relaxation curves;
 B_1 – the point of intersection of tangents to relaxation curves with a further increase in relaxation time

Средняя влажность образца составляла 217 %. В начале релаксации толщина обезвоженного поверхностного слоя S составляла 0,925 мм, через 2,5 ч релаксации толщина обезвоженного поверхностного слоя увеличилась до $l_0 = 1,18$ мм. Влажность на поверхности слоя составила 174 %.

Если путассу непрерывно обезвоживать перед релаксацией более 55 ч, то толщина сухого слоя составит $S = 0,89$ мм, а точка поворота совпадет с толщиной сухого слоя даже при непрерывной последующей релаксации в течение 4 ч. Поэтому дли-

тельное обезвоживание перед релаксацией не способствует снижению энергетических затрат на сушку рыбы. Относительная погрешность расчетного значения толщины сухого слоя и найденного экспериментальным путем составила 14 %.

В таблице представлены экспериментальные данные по изменению показателей обезвоженного поверхностного слоя путассу (толщины и твердости структуры) при температуре сушильного агента 25 °C при конечной влажности рыбы на общую массу от 62 до 64 %.

Показатели обезвоженного слоя путассу (толщина, твердость)
в зависимости от относительной влажности сушильного агента при температуре 25 °С

Indicators of the dehydrated layer of blue whiting (thickness, hardness)
depending on the relative humidity of the drying agent at a temperature of 25°C

Относительная влажность сушильного агента, %	Толщина обезвоженного слоя, мм	Усилие резания обезвоженного слоя, г	Темп обезвоживания, %/ч
20	1,20 ± 0,15	440 ± 151	29,0
40	1,10 ± 0,12	264 ± 62	21,1
50	1,03 ± 0,12	166 ± 53	14,7

Толщина слоя незначительно уменьшается при сушке теплоносителем с достаточно высокой относительной влажностью. Следует отметить, что усилие резания возрастает при сушке теплоносителем с низкой относительной влажностью. Это связано с более интенсивным обезвоживанием. Для темпа обезвоживания 29,0 %/ч усилие резания принимало наибольшее значение из рассмотренных вариантов. Данный факт свидетельствует об увеличении твердости обезвоженного поверхностного слоя при использовании интенсивных режимов сушки. Для данных процессов конвективной холодной сушки рыбы целесообразно использовать режимы релаксации с целью рационального использования теплоносителя и экономии энергоресурсов. Так, во время релаксации нагревательные элементы сушильной установки выключаются и в установку подается теплоноситель температурой на 4–6 °С ниже температуры непосредственного обезвоживания, относительная влажность теплоносителя от 60 до 80 % (экспериментально установлено, что при температуре 20 °С и относительной влажности более 70 % выраженный сухой поверхностный слой не образуется). Для осуществления процесса релаксации возможно использование смешанного свежего уличного и цехового воздуха.

Время включения в процесс сушки, по нашему мнению, должно совпадать с образованием на кривой кинетики сушки критической точки K_2 (см. рис. 2). В дальнейшей работе планируется расчетным и экспериментальным путем обосновать периодичность и длительность применения фаз релаксации в процессе сушки рыбы.

Обсуждение

Расчетным путем получены графические зависимости распределения влажности в рыбе при температуре процесса сушки 27,5 °С. При продолжительности процесса сушки 2 ч средняя влажность рыбы в пересчете на сухое вещество принимала значение 333 %. Для этого момента времени определена толщина поверхностного обезвоженного слоя – 1,6 мм. Влажность на поверхности этого слоя составила 272 % в расчете на сухое вещество. После релаксации в течение 1,5 ч влажность на поверхности рыбы составила 330 % в пересчете на

сухое вещество, при этом толщина обезвоженного поверхностного слоя увеличилась до 2,23 мм. Об эффективности процесса перераспределения влаги можно судить, если сравнить значения влажности на поверхности и средней влажности образца. Эффективность перераспределения влаги для длительности обезвоживания в течение 2 ч имела максимальное значение.

Средняя влажность путассу после обезвоживания продолжительностью 2,5 ч составила 323 % в расчете на сухое вещество. Толщина обезвоженного слоя – 1,45 мм. Через 1,5 ч релаксации влажность на поверхности рыбы увеличилась с 243 до 315 % в расчете на сухое вещество, а толщина обезвоженного слоя возросла до 2,2 мм. Данные результаты релаксации сопоставимы с результатами при обезвоживании в течение 2 ч. В этих случаях наблюдается достаточно быстрое повышение влажности обезвоженного слоя. Также следует отметить существенное увеличение толщины обезвоженного поверхностного слоя после релаксации примерно на 0,7 мм. Это также свидетельствует о том, что слой на данном этапе сушки способен к насыщению водой из центральных слоев рыбы, он не имеет твердой структуры.

При продолжительности процесса сушки в течение 13,5 ч средняя влажность рыбы имеет значение 217 % в расчете на сухое вещество. Для этого момента времени обезвоженный поверхностный слой имеет толщину 0,9 мм. При достаточно длительной релаксации (2,5 ч) толщина поверхностного слоя увеличилась на 0,3 мм, а влажность на поверхности этого слоя достигла 174 % в расчете на сухое вещество.

При непрерывном обезвоживании путассу перед релаксацией более 55 ч толщина поверхностного обезвоженного слоя составила 0,89 мм. Толщина сухого слоя остается неизменной при перераспределении влаги в течение 4 ч. Результаты моделирования толщины обезвоженного слоя сопоставимы со значениями, найденными экспериментальным путем.

Обезвоженный слой имеет низкие влагопроводные свойства и сдерживает процесс сушки в целом, поэтому актуальным остается поиск технологических режимов обезвоживания, снижающих возникновение на поверхности рыбы слоя с низкими диффузионными свойствами. Для повышения эффективности процесса вяления рыб необходимо рацио-

нально применять режимы перераспределения воды в процессе сушки и не допускать образования плотного обезвоженного поверхностного слоя. Длительное обезвоживание перед релаксацией не способствует снижению энергетических затрат на сушку рыбы. В последующих работах планируется провести дополнительные исследования по влиянию длительности релаксации на энергоэффективность процесса сушки.

В работе В. А. Наумова, А. Э. Суслова, Ю. А. Фатыховых [18] найдены схожие зависимости распределения влажности по толщине рыбы путем моделирования. Эти зависимости получены для безразмерного влагосодержания при различных значениях числа подобия Био [18]. Однако в настоящей работе данные кривые имеют размерность для толщины и влажности рыбы. В исследовании L. Maugot, A. M. Sereno [12] установлено, что пищевые продукты могут подвергаться усадке в процессе сушки. Усадка пищевых материалов увеличивается с увеличением объема удаленной воды. Чем больше удалено воды, тем больше напряжений сжатия возникает в материале [12]. В данной работе моделирование обезвоженного слоя осуществлялось без учета влияния усадки всего высушиваемого образца. Однако уменьшение толщины и влажности обезвоженного поверхностного слоя, найденные в настоящей работе, свидетельствует о его уплотнении и усадке по мере процесса сушки. В работе N. N. Potter, J. Hotchkiss [13] сообщается, что усадка материала происходит неравномерно по его объему, т. к. влага из продукции не удаляется равномерно, а также пищевые продукты редко обладают идеальной эластичностью. Исследователями А. Э. Сусло-

вым, Ю. А. Фатыховым [9] установлено, что повышение температуры воздуха до 30 °С при обезвоживании окуня обеспечивает интенсификацию процесса, но также приводит к ухудшению условий сушки, т. к. пересушивание поверхностных слоев способствует образованию плотного поверхностного слоя, препятствующего термовлагодиффузии. В настоящей работе найдена толщина сухого обезвоженного слоя расчетным методом. Получены экспериментальные значения толщины обезвоженного слоя при температуре теплоносителя 25 °С и относительной влажности от 20 до 50 %.

Заключение

Предложен метод расчета релаксационных кривых, который может применяться для исследования процессов перераспределения влаги в объекте обработки с целью создания рациональных режимов сушки. Определена толщина сухого слоя расчетным и экспериментальным путем. В результате анализа полученных расчетных релаксационных кривых распределения влаги по толщине рыбы можно сделать вывод о том, что применение процессов релаксации целесообразно после завершения периода постоянной скорости сушки. В начальный период сушки обезвоженный слой достаточно быстро насыщается влагой из центральных слоев, при этом толщина его увеличивается. К концу процесса сушки обезвоженный слой уплотняется, а эффективность релаксации снижается. Также установлено, что на формирование обезвоженного слоя рыбы в значительной степени влияют интенсивные режимы сушки.

Список источников

1. Об утверждении стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года и план действий по ее реализации: Постановление Правительства РФ от 26 ноября 2019 г. № 2798-р. URL: [//www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72972854/#1000.%2010%20oct.%202022](http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72972854/#1000.%2010%20oct.%202022) (дата обращения: 04.11.2023).
2. Скульская Л. В., Широкова Т. К. О проблемах рыбохозяйственного комплекса России // Экономика и бизнес: теория и практика. 2022. № 1-1 (83). С. 193–203. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-1-183-193-203.
3. Бессмертная И. А., Ермакова Ю. А. Совершенствование технологии вяленой рыбопродукции // Инновации в технологии продуктов здорового питания: материалы Междунар. науч. конф. (Калининград, 26 мая 2016 г.). Калининград: Изд-во Калининград. ГТУ, 2016. С. 54–60.
4. Davis L. et al. Lipid oxidation in salted dried fish: The effect of temperature and light on the rate of oxidation of a fish oil // Journal of the Science of Food and Agriculture. 1993. V. 62. N. 4. P. 355–359.
5. Raghunath M. R., Sankar Th. V., Ammu K., Devadasan K. Biochemical and nutritional changes in fish proteins during drying // Journal of the Science of Food and Agriculture. 1995. V. 67. N. 2. P. 197–204.
6. Siddhnath Kumar, Amit Ranjan, Bimal Prasanna Mohanty, Pooja Saklani. Dry fish and its contribution towards food and nutritional security // Food Reviews International. 2022. V. 38. N. 4. P. 508–536.
7. Kliuchnikov A. Development of new method of drying at energy-saving universal dryer to improve quality of crops used in fodder production // Proceedings of the 18th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (Jelgava, Latvia, 22–24 May 2019). Latvia University of Life Sciences and Technologies, 2019. P. 105–111.
8. Boziaris I. S. Seafood processing: Technology, quality and safety. John Wiley & Sons, 2014. 512 p.
9. Суслов А. Э., Фатыхов Ю. А. Результаты исследования процесса сушки окуня // Изв. КГТУ. 2011. № 23. С. 133–140.
10. Суслов А. Э., Фатыхов Ю. А. Результаты исследования процесса сушки рыбы (плотва и чехонь) // Процессы и аппараты пищевых производств. 2012. № 1. С. 51.
11. Jain D., Pathare P. B. Study the drying kinetics of open sun drying of fish // Journal of food Engineering. 2007. V. 78. N. 4. P. 1315–1319.

12. Mayor L., Sereno A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review // *Journal of food engineering*. 2004. V. 61. N. 3. P. 373–386.

13. Potter N. N., Hotchkiss J. H. *Food science*. Springer Science & Business Media, 2012. P. 200–211.

14. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 372 с.

15. Castro A. M., Mayorga E. Y., Moreno F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review // *Journal of food engineering*. 2018. V. 223. P. 152–167.

16. Elmesery H. S., Tolba N. M., Kamel R. M. Mathematical modelling and performance analysis of airflow distribution systems inside convection hot-air dryers // *Alexandria Engineering Journal*. 2023. V. 62. P. 237–256.

17. Heilporn C., Debaste F., Boey C., Haut B., van der Pol F., Nonclercq A. Implementation of a rational drying process for fish conservation // *Food Security*. 2010. V. 2. P. 71–80.

18. Наумов В. А., Суслов А. Э., Фатыхов Ю. А. Граничные условия при конвективной сушке рыбы // *Вестн. МГТУ*. 2015. Т. 18. № 4. С. 647–653.

1. *Ob utverzhdenii strategii razvitiia rybokhoziaistvennogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda i plan deistvii po ee realizatsii: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 26 noiabria 2019 g. № 2798-r* [On approval of the strategy for the development of the fisheries complex of the Russian Federation for the period up to 2030 and the action plan for its implementation: Decree of the Government of the Russian Federation dated November 26, 2019 No. 2798-r]. Available at: [//www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72972854/#1000.%2010%20oct.%202022](http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72972854/#1000.%2010%20oct.%202022) (accessed: 04.11.2023).

2. Skul'skaia L. V., Shirokova T. K. O problemakh rybokhoziaistvennogo kompleksa Rossii [About the problems of the Russian fisheries complex]. *Ekonomika i biznes: teoriia i praktika*, 2022, no. 1-1 (83), pp. 193-203. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-1-183-193-203.

3. Bessmertnaia I. A., Ermakova Iu. A. Sovershenstvovanie tekhnologii vialenoi ryboproduktsii [Improving the technology of dried fish products]. *Innovatsii v tekhnologii produktov zdorovogo pitaniia: materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Kaliningrad, 26 maia 2016 g.)*. Kaliningrad, Izd-vo Kaliningrad. GTU, 2016. Pp. 54-60.

4. Davis L. et al. Lipid oxidation in salted dried fish: The effect of temperature and light on the rate of oxidation of a fish oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1993, vol. 62, no. 4, pp. 355-359.

5. Raghunath M. R., Sankar Th. V., Ammu K., Devadasan K. Biochemical and nutritional changes in fish proteins during drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1995, vol. 67, no. 2, pp. 197-204.

6. Siddhath Kumar, Amit Ranjan, Bimal Prasanna Mohanty, Pooja Saklani. Dry fish and its contribution towards food and nutritional security. *Food Reviews International*, 2022, vol. 38, no. 4, pp. 508-536.

7. Kliuchnikov A. Development of new method of drying at energy-saving universal dryer to improve quality of crops used in fodder production. *Proceedings of the 18th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development" (Jelgava, Latvia, 22–24 May 2019)*. Latvia University of Life Sciences and Technologies, 2019. Pp. 105-111.

8. Boziaris I. S. *Seafood processing: Technology, quality*

19. Наумов В. А., Суслов А. Э., Фатыхов Ю. А. О выборе рациональных параметров процесса конвективной сушки пресноводных видов рыбы // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2017. № 2 (16). С. 59–64.

20. Ershov M. A., Ershov A. M., Votinov M. V. Mass transfer processes modeling in the production of dried and air-dried fish // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2022. V. 1052. N. 1. P. 012067.

21. ГОСТ 7636-85. Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа. М.: Стандартинформ, 2010. 121 с.

22. Ershov M. A. The relaxation processes calculation of fish dehydrated surface layer during drying and smoking // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019. V. 302. N. 1. P. 012021.

23. Ершов А. М., Ершов М. А., Николаенко О. А. Методика расчета кривых кинетики и динамики обезвоживания в процессах вяления и холодного копчения рыбы // *Вестн. МГТУ*. 2010. Т. 13. № 4–2. С. 947–950.

References

and safety. John Wiley & Sons, 2014. 512 p.

9. Suslov A. E., Fatykhov Iu. A. Rezul'taty issledovaniia protsessa sushki okunia [The results of the study of the drying process of perch]. *Izvestiia KGTU*, 2011, no. 23, pp. 133-140.

10. Suslov A. E., Fatykhov Iu. A. Rezul'taty issledovaniia protsessa sushki ryby (plotva i chekhon') [The results of the study of the drying process of fish (roach and chehon)]. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*, 2012, no. 1, p. 51.

11. Jain D., Pathare P. B. Study the drying kinetics of open sun drying of fish. *Journal of food Engineering*, 2007, vol. 78, no. 4, pp. 1315-1319.

12. Mayor L., Sereno A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of food engineering*, 2004, vol. 61, no. 3, pp. 373-386.

13. Potter N. N., Hotchkiss J. H. *Food science*. Springer Science & Business Media, 2012. Pp. 200-211.

14. Lykov A. V. *Teoriia sushki* [Drying theory]. Moscow, Energiia Publ., 1968. 372 p.

15. Castro A. M., Mayorga E. Y., Moreno F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. *Journal of food engineering*, 2018, vol. 223, pp. 152-167.

16. Elmesery H. S., Tolba N. M., Kamel R. M. Mathematical modelling and performance analysis of airflow distribution systems inside convection hot-air dryers. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, vol. 62, pp. 237-256.

17. Heilporn C., Debaste F., Boey C., Haut B., van der Pol F., Nonclercq A. Implementation of a rational drying process for fish conservation. *Food Security*, 2010, vol. 2, pp. 71-80.

18. Naumov V. A., Suslov A. E., Fatykhov Iu. A. Granichnye usloviia pri konvektivnoi sushke ryby [Boundary conditions for convective drying of fish]. *Vestnik MGTU*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 647-653.

19. Naumov V. A., Suslov A. E., Fatykhov Iu. A. O vybere ratsional'nykh parametrov protsessa konvektivnoi sushki presnovodnykh vidov ryby [On the choice of rational parameters of the process of convective drying of freshwater fish species]. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvaiushchei promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniia*, 2017, no. 2 (16), pp. 59-64.

20. Ershov M. A., Ershov A. M., Votinov M. V. Mass transfer processes modeling in the production of dried and air-

dried fish. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2022. Vol. 1052. No. 1. P. 012067.

21. GOST 7636-85. *Ryba, morskije mlekopitaiushchie, morskije bespozvonochnye i produkty ikh pererabotki. Metody analiza* [ISS 7636-85. Fish, marine mammals, marine invertebrates and products of their processing. Methods of analysis]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 121 p.

22. Ershov M. A. The relaxation processes calculation of fish dehydrated surface layer during drying and smoking. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

IOP Publishing, 2019. Vol. 302. No. 1. P. 012021.

23. Ershov A. M., Ershov M. A., Nikolaenko O. A. Metodika rascheta krivykh kinetiki i dinamiki obezvozhivaniia v protsessakh vialenii i kholodnogo kopcheniia ryby [Method of calculation of kinetics curves and dynamics of dehydration in the processes of drying and cold smoking of fish]. *Vestnik MGTU*, 2010, vol. 13, no. 4-2, pp. 947-950.

Статья поступила в редакцию 06.11.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023; принята к публикации 11.03.2024
The article was submitted 06.11.2023; approved after reviewing 05.12.2023; accepted for publication 11.03.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Александрович Ершов – кандидат технических наук; доцент кафедры технологий пищевых производств; Мурманский арктический университет; ershovma@mstu.edu.ru

Людмила Казимировна Куранова – кандидат технических наук; ведущий научный сотрудник кафедры технологий пищевых производств; Мурманский арктический университет; kuranovalk@mstu.edu.ru

Виктор Валерьевич Ерещенко – старший преподаватель кафедры автоматизации и вычислительной техники; Мурманский арктический университет; smimovaiv@mstu.edu.ru

Ирина Владимировна Смирнова – доцент кафедры иностранных языков; Мурманский арктический университет; smirnovaiv@mstu.edu.ru

Юлия Вячеславовна Живлянцева – начальник отдела микробиологических исследований; Мурманский филиал ФГБУ «Национальный центр безопасности продукции водного промысла и аквакультуры»; Yoliapetrakova@mail.ru

Mikhail A. Ershov – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Food Production Technologies; Murmansk Arctic University; ershovma@mstu.edu.ru

Ludmila K. Kuranova – Candidate of Technical Sciences; Leading Researcher of the Department of Food Production Technologies; Murmansk Arctic University; kuranovalk@mstu.edu.ru

Victor V. Ereshchenko – Senior Lecturer of the Department of Automation and Computer Engineering; Murmansk Arctic University; smirnovaiv@mstu.edu.ru

Irina V. Smirnova – Assistant Professor of the Department of Foreign Languages; Murmansk Arctic University; smirnovaiv@mstu.edu.ru

Julia V. Zhivlyantseva – Head of the Microbiological Research Department; Murmansk Branch Federal State Budgetary Institution “National Center for the Safety of Aquatic Products and Aquaculture”; Yoliapetrakova@mail.ru

