Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 69, № 3. С. 110–120.
Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2024. Vol. 69, no 3. P. 110–120.

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Научная статья
УДК 531.754:664.8.047
DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-69-10
EDN: JNMTUW

Исследование плотности и гигроскопических характеристик печени сома как объекта обезвоживания

Андрей Сергеевич Яснов[1], Сергей Алексеевич Бредихин[2], Альберт Хамед–Харисович Нугманов[3], Игорь Юрьевич Алексанян[4], Павел Дмитриевич Осмоловский[5]
[1, 4]Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия
[2, 3] ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия
[5] Липецкий НИИ рапса – филиал ФГБНУ ФНЦ «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта», Липецк, Россия
[1] ysandrew@mail.ru, ORCID: 0009-0002-1728-0718
[2] sbredihin_kpia@rgau-msha.ru, ORCID: 0000-0002-6898-0389
[3] nugmanov@rgau-msha.ru, ORCID: 0000-0002-4093-9982
[4]16081960igor@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5494-1226
[5] pavel.osmolovsku@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1131-1552

Аннотация. Рыбные субпродукты представляют большой интерес для исследований с целью получения из них продуктов с добавленной стоимостью. Кроме того, они также являются ценным источником многочисленных соединений, необходимых для производства различных пищевых добавок. Рыбья печень, твердый компонент отходов переработки рыбы, обладает особыми биологическими свойствами и может быть использована для разработки уникальных пищевых ингредиентов, но в настоящее время ее смешивают с другими рыбными побочными продуктами и в лучшем случае перерабатывают в рыбную муку или масло, а в худшем случае подвергнут утилизации. Чтобы максимально сохранить полезные для организма человека вещества в печени, ее обезвоживают с помощью процесса сушки и хранят в специально подобранных условиях. При определении рационального способа удаления воды из термолабильных материалов, в том числе печени, выборе их оптимального конечного влагосодержания и моделировании процессов тепломассообмена этого материала рекомендуется изучать структурно-механические свойства, особенно плотность и гигроскопические свойства продукта. В качестве объекта исследования использовали печень сома (*Silurus glanis*). Исследованы сырая и высушенная печень сома. Установлены зависимости значений плотности и гигроскопических свойств печени сома от ее влажности в заданных диапазонах их варьирования. Сравнение представленных результатов с известными данными по аналогичным материалам показывает, что они согласуются и поэтому могут использоваться в инженерной практике пищевой промышленности.

© Яснов А. С., Бредихин С. А., Нугманов А. Х.-Х., Алексанян И. Ю., Осмоловский П. Д., 2024

Ключевые слова: печень сома, влажность, сушка, гигроскопические свойства, плотность, тепломассообмен, изотермы сорбции, энергия связи влаги с материалом

Для цитирования: Яснов А. С., Бредихин С. А., Нугманов А. Х.-Х., Алексанян И. Ю., Осмоловский П. Д. Исследование плотности и гигроскопических характеристик печени сома как объекта обезвоживания // Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 69, № 3. С. 110–120.

FOOD SYSTEMS

Original article

Identification of density and hygroscopic characteristics of catfish liver as an object of dehydration

Andrey S. Yasnov[1], Sergey A. Bredikhin[2], Albert H.–H. Nugmanov[3], Igor Yu. Aleksanyan[4], Pavel D. Osmolovskiy[5]

[1, 4] Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

[2, 3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU – MTAA), Moscow, Russia

[5] Lipetsk Rapeseed Research Institute – the Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Center, V.S. Pustovoit All- Russian Research Institute of oil crops, Lipetsk, Russia

[1] ysandrew@mail.ru, ORCID: 0009-0002-1728-0718

[2] sbredihin_kpia@rgau-msha.ru, ORCID: 0000-0002-6898-0389

[3] nugmanov@rgau-msha.ru, ORCID: 0000-0002-4093-9982

[4]16081960igor@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5494-1226

[5] pavel.osmolovsku@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1131-1552

Abstract. Fish by-products are of great interest for research in order to obtain value-added products from them. In addition, they are also a valuable source of numerous compounds needed for the production of various food additives. Fish liver, a solid component of fish processing waste, has special biological properties and can be used to develop unique food ingredients, but it is currently mixed with other fish by-products, and at best processed into fishmeal or oil, and at worst disposed of. To maximize the preservation of substances useful to the human body in the liver, it is dehydrated through the drying process and stored in specially selected conditions. When determining a rational method for removing water from thermolabile materials, including the liver, choosing their optimal final moisture content and modeling the processes of heat and mass transfer of this material, it is recommended to study the structural and mechanical properties, especially the density and hygroscopic properties of the product. The liver of the catfish (Silurus glanis) was used as the object of the study. Raw and dried catfish liver were studied. The dependences of the values of density and hygroscopic properties of the catfish liver on its humidity in the specified ranges of their variation have been established. A comparison of the presented results with known data on similar materials shows that they are consistent and therefore can be used in the engineering practice of the food industry.

Keywords*:* catfish liver, humidity, drying, hygroscopic properties, density, heat and mass transfer, sorption isotherms, moisture binding energy with the material

For citation: Yasnov A. S., Bredikhin S. A., Nugmanov A. H.-H., Aleksanyan I. Yu., Osmolovskiy P. D. Identification of density and hygroscopic characteristics of catfish liver as an object of dehydration. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University.* 2024; 69(3): 110-120. (in Russ.).

Введение

При переработке сома обыкновенного первичным и наиболее конкурентоспособным рыбным продуктом является свежее или замороженное филе. Выход готового продукта составляет 40–50 %, а получаемые отходы от производства направляют на корм скоту, птице и другие цели, либо утилизируются, что не соответствует экологической безопасности. При этом внутренности и костные компоненты рыбы являются ценным вторичным сырьем, содержащим широкий спектр макроэлементов и минералов. Частью внутренних отходов является печень рыб, которая обладает особыми химическими свойствами и может быть использована для разработки уникальных пищевых ингредиентов, при этом в настоящее время ее смешивают с другими рыбными субпродуктами и в лучшем случае превращают в рыбную муку или масло, а в худшем – выбрасывают [1, 2]. Для максимального сохранения в печени полезных для организма человека ее подвергают консервации методом обезвоживания в специально подобранных для этих целей условиях сушки. При определении рациональных режимов влагоудаления из термолабильных субстанций, к которым относится и печень сома, выбора ее оптимальной конечной влажности и моделирования тепло-массообменного процесса целесообразно изучить структурно-механические, в частности, плотность и гигроскопические характеристики этого побочного субпродукта.

При равновесных условиях влажность объекта сушки обусловлена типом и энергией связи воды в ней с сухим остатком, а также температурой (T) системы и относительной влажностью воздуха (φ) во внешней по отношению к навеске среде. Изотерма сорбции выражает связь между равновесной влажностью (W_0) при равновесии и отвечающей ей соответствующей φ при фиксированной T, которая аналитически корректно не представлена, что предопределяет ее опытное выявление [3, 4, 5].

Для определения рациональных режимов влагоудаления из термолабильных субстанций, к которым относится и исследуемая печень рыб, выбора ее оптимальной конечной влажности и моделирования обозначенной операции целесообразно изучить, в частности, плотность (ρ) и гигроскопические свойства, что и послужило **целью данного исследования.**

Объект и методы исследования

Объектом изучения является печень сома обыкновенного (*Silurus glanis*). Полученные на предприятии печеночные сырые образцы после разделки рыбы немедленно замораживали и выдерживали при температуре минус 20 °С до измельчения и анализа. Далее образцы размораживали и измельчали с помощью мясорубки марки «Торгтехмаш МИМ-600 М», после чего половину из полученной печени хранили при температуре минус 25 °С в качестве сырого образца, а другую половину подвергали микроволновой сушке на лабораторной установке по исследованию различных способов обезвоживания материалов [6], а затем измельчали в блендере. Высушенную печень сома хранили при минус 25 °С. В итоге исследованию подвергалась как сырая печень, так и высушенная при воздействии микроволнового излучения при следующих параметрах: частота излучения – 2,45 ГГц; мощность излучения – 180 Вт.

В исследовании применялись следующие методы:

1. Процентное содержание влаги в рыбной печени определялось гравиметрическим методом, в основе которого лежит оценка изменения массы навески образца после термического воздействия на него в сушильном шкафу при температуре 105 ºС. В нашем случае для определения содержания влажности в рыбной печени использовался термогравиметрический анализатор влажности МХ-50, который с помощью направленной галогеновой лампы на объект

исследования реализует быстрый и равномерный его нагрев, тем самым сокращая продолжительность проведения опыта.

2. Изотермы сорбции влаги описывают соотношение между равновесным содержанием влаги в навеске и φ паровоздушной среды при фиксированной *T*. Реализовывали тензометрический способ следующим образом. Навески с известной влажностью выстаивали в эксикаторной емкости над сернокислым раствором варьируемой концентрации, соответствующей определенной относительной влажности паровоздушной среды до стабилизации массы образца, что соответствует условиям равновесия. Равновесную влажность W_0 находили

$$W_0 = \frac{G_2 - G_1(1 - W_{\text{образца}})}{G_2}, \quad (1)$$

где $W_{\text{образца}}$ – исходная для навески влажность, кг/кг; G_1 – ее исходная масса; G_2 – ее масса в равновесных условиях, кг.

3. Плотность печени сома ρ определяли пикнометрическим способом [7, 8, 9]. Определение плотности пикнометром основано на измерении отношения массы определенного объема исследуемого вещества к массе эталонной жидкости, взятой в таком же объеме, при этом температура вещества должна совпадать с температурой этой жидкости. Плотность определяли для печени сома как в сыром, так и в сухом измельченном виде.

Результаты и их обсуждение

Опытные данные по *W* печени сома показаны в табл. 1.

Таблица 1

Опытные данные по W печени сома из рыбы различной массы вылова

Table 1

Experimental data on the W liver of catfish from fish of various catch weights

Наименование	Содержание влаги в печени, %					
	1	2	3	4	5	Среднее
Сом, весом 0,54 кг	68,12	67,53	67,69	68,21	67,60	67,83
Сом, весом 0,89 кг	67,92	69,24	68,73	68,54	71,27	69,14
Сом, весом 1,19 кг	66,89	68,44	68,15	67,53	68,04	67,81
Среднее значение						**68,26**

Анализ результатов, представленных в табл. 1, показывает, что масса рыбы практически не влияет на *W* печени, извлеченной из сома при его разделке, а так как *W* обусловливает консистенцию и структурную организацию печени сома и влияет на ее стабильность при хранении и обработке, то дальнейшее распределение внутренностей в зависимости от веса рыбы не является резонным.

В процессе получения изотермы сорбции обоснованно считают [10, 11, 12], что величины активности воды A_w и φ идентичны по причине равнозначности φ в равновесных условиях во всем объеме эксикаторной емкости. В итоге опытным путем получены изотермы сорбции печени сома, при *T* в системе 25 ºС и 40 ºС, приведенные на рис. 1 и 2. На изотерме сорбции наблюдаются 3 стадии, при этом особенно четко они выражены в полулогарифмической координатной сетке (рис. 3, 4).

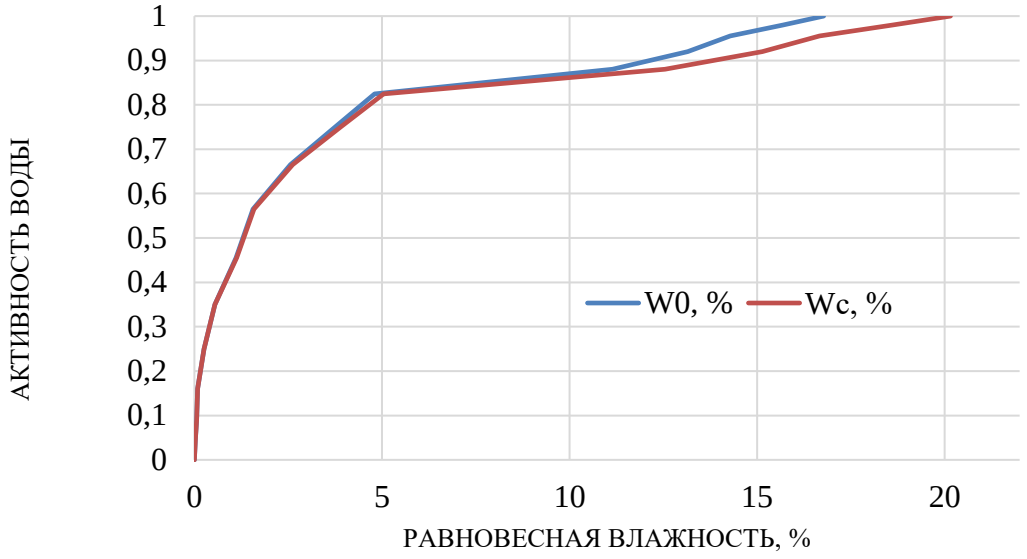

Рис. 1. Изотерма сорбции при 25 ºС: W_0 – равновесная влажность печени сома; W_c – равновесное влагосодержание печени сома. Составлено авторами

Fig. 1. Sorption isotherm at 25 ºC: W_0 – catfish liver moisture; W_c– catfish liver moisture content. Compiled by the authors

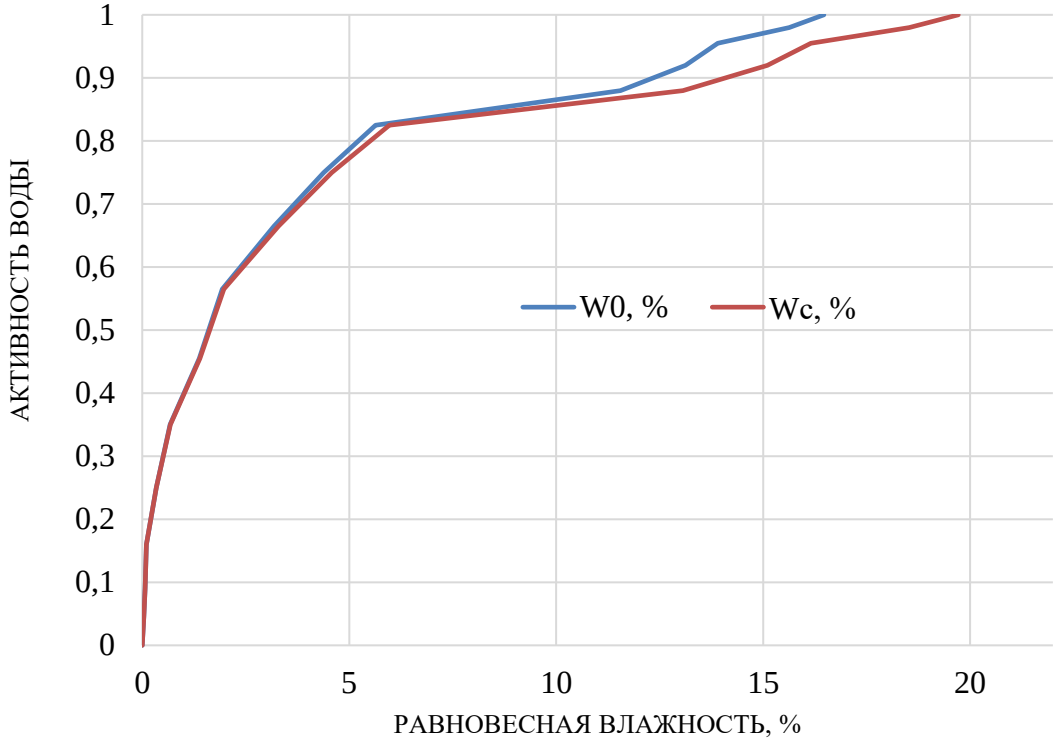

Рис. 2. Изотерма сорбции при 40 ºС: W_0 – равновесная влажность печени сома; W_c – равновесное влагосодержание печени сома. Составлено авторами

Fig. 2. Sorption isotherm at 40 ºC: W_0 – catfish liver moisture; W_c– catfish liver moisture content. Compiled by the authors

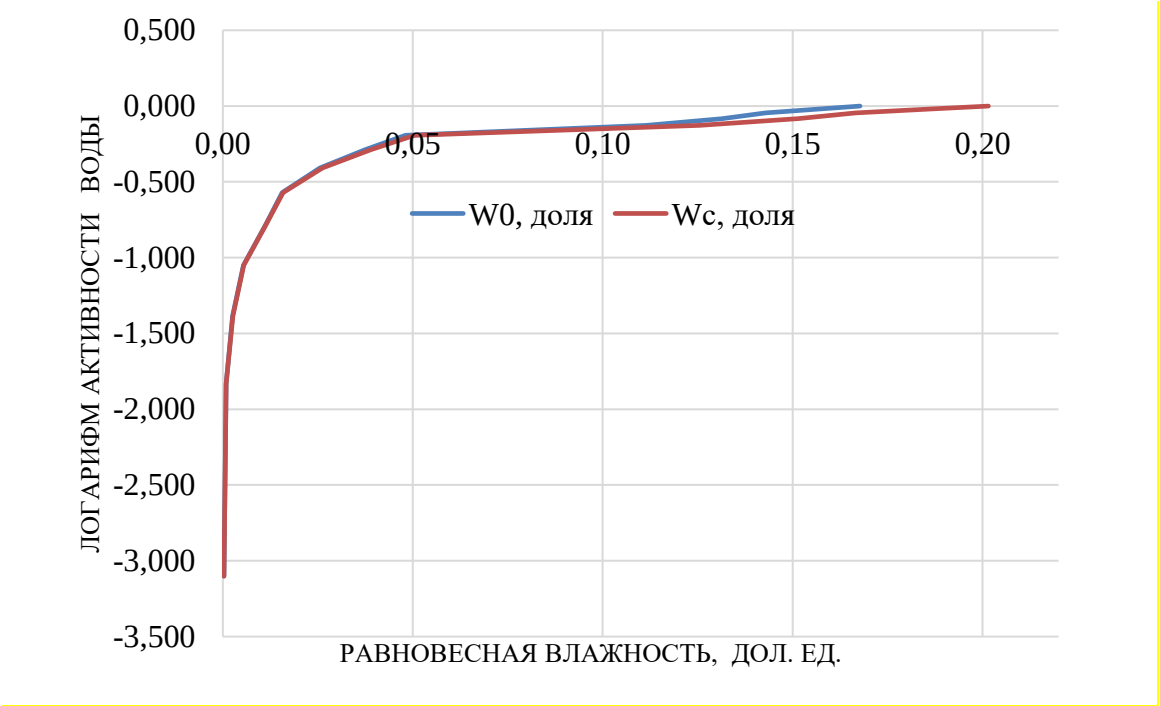

Рис. 3. Изотерма сорбции при 25 °С в полулогарифмической сетке: W_0 – равновесная влажность печени сома; W_c – равновесное влагосодержание печени сома. Составлено авторами
Fig. 3. Sorption isotherm at 25 °C in a semi-logarithmic grid: W_0 – catfish liver moisture; W_c– catfish liver moisture content. Compiled by the authors

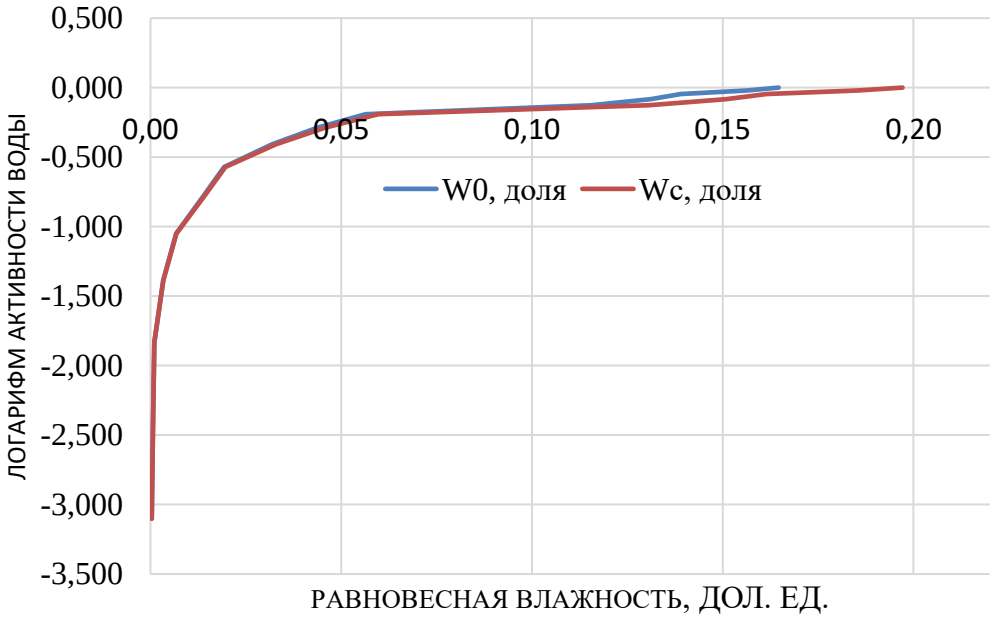

Рис. 4. Изотерма сорбции при 40 °С в полулогарифмической сетке: W_0 – равновесная влажность печени сома; W_c – равновесное влагосодержание печени сома. Составлено авторами
Fig. 4. Sorption isotherm at 40 °C in a semi-logarithmic grid: W_0 – catfish liver moisture; W_c– catfish liver moisture content. Compiled by the authors

Из изотермы сорбции на рис. 1 и 2 следует то, что при 40 °С итоговая W в навеске падает по отношению к изотерме сорбции, построенной при 25 °С, т.е. с 16,77 до 16,47 %. Наблюдаемое явление вполне объяснимо, так как физическая сорбция как любой экзотермический процесс в целом ухудшается с ростом температуры. На изотерме сорбции (см. рис. 3, 4) наблюдаются точки перегиба, отвечающие W_0 при варьировании механизма сорбционного взаимодействия. На рис. 3 данные перегибы наблюдаются при W_0, равной 0,54 и 3,75 %, а на изотерме сорбции (рис. 4) – 0,67 и 4,38 %.

Построенные изотермы сорбции соответствуют 3 типу [13, 14] пищевого сырья, как и основное число белковых субстанций. Это обусловлено скапливанием влаги на активных центрах при росте φ, при этом создаются агломерации молекулярных структур, которые меняют структурную организацию протеиновых макромолекулярных структур при сдвиге боковых цепочек или развороте глобул. По этой причине открывается доступ к новым активным центрам, взаимодействующим с добавочными молекулярными водными порциями, создаются полимолекулярные связи. Водная среда в таком варианте является промежуточным звеном, создавая с гидроксильными группами водородные связи, что определяет тот факт, что при $W_0 \leq 0{,}54$ % (рис. 3) вид изотермы сорбции обусловлен только мономолекулярным взаимодействием.

Макромолекулярным конформациям соответствует высокий уровень необратимости, что и служит причиной повышенной W печени сома при $0{,}54 \leq W_0, \% \leq 3{,}75$ (см. рис. 3). В этих рамках при повышении массы адсорбционной воды тепловые колебания ее молекулярных структур разбивают их цепочки, которые образуют выгодные конформации с энергетической точки зрения, не нарушая ориентированность молекул, что и определяет полимолекулярную адсорбцию в данном диапазоне влажностей. Далее водные молекулярные структуры продвигаются в межмолекулярные зазоры, что при тепловых молекулярных колебаниях обусловливает некоторое набухание материала.

При $3{,}75 \leq W_0, \% \leq 16{,}77$ наблюдается беспрепятственный трансфер цепей мономерных протеиновых остатков с поверхностными гидратными прослойками, что приводит к снижению энергии связи воды с сухим остатком.

Заметим, что на 1-й стадии сорбции формируется молекулярный «монослой», сильно связанный с сухим скелетом, что обусловливает падение микробиальной активности, и по этой причине W верхней границы этой стадии соответствует диапазону $3{,}78 \leq W_0 \leq 4{,}38$, в связи с чем крайне правое значение и принимаем за итоговую при обезвоживании W, равную 5 % (см. рис. 3, 4). В точках перегиба на изотерме сорбции происходит варьирование превалирования того или иного типа связи воды с сухим скелетом (адсорбционная, структурная разной природы, капиллярная).

В работе [5] приведен вариант математической аппроксимации изотермы сорбции, которую делят на две зоны – от W_0 до W_m и от W_m до окончания гигроскопической зоны, где мономолекулярный адсорбционный слой трансформируется в полимолекулярный и переходит в свободное состояние. Данная точка находится на пересечении нормали из 1-й точки перегиба с осью абсцисс. Так как вода монослоя от 0 до W_0 не отводится при сушке, эта стадия изотермы сорбции не участвует в аппроксимации. W_m обусловливает трансформацию адсорбционной воды в капиллярно- и структурно-связанную. Данная точка находится на пересечении нормали из 2-й точки перегиба к оси абсцисс (рис. 5).

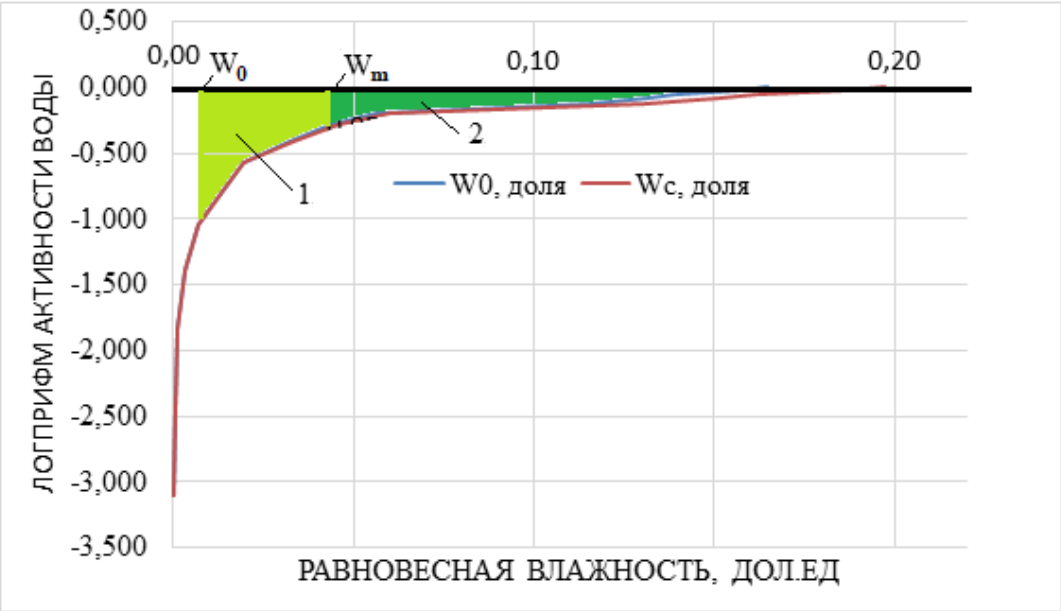

Рис. 5. Зависимость логарифма активности воды от равновесной влажности при температуре 40 °С: 1 – участок адсорбционно связанной влаги; 2 – участок капиллярно-осмотической связи. Составлено авторами

Fig. 5. The dependence of the logarithm of water activity on the equilibrium humidity at a temperature of 40 °C: 1 – a site of adsorption–bound moisture; 2 – a site of capillary-osmotic coupling. Compiled by the authors

Опытные данные по плотности сырой и сухой печени сома приведены в табл. 2.

Таблица 2

Плотность сырой и сухой печени сома

Table 2

Density of raw and dry catfish liver

Объект изучения	ρ, кг/м^3
Печень сома при W = 68 %	1037±4
Печень сома при W = 5%	747±3

Известно, что плотность ρ является аддитивной величиной и её зависимость от влажности W линейна. В исследованиях была определена плотность ρ для печени сома при влажности W 68 % и 5 % соответственно.

На основе результатов экспериментальных исследований в указанных выше диапазонах температуры и влажности получена зависимость

$$\rho = 460{,}32W + 722{,}98. \quad (2)$$

Зависимость плотности ρ печени сома в диапазоне температуры T = 5…25 °С и влажности W от 0,05 до 0,68 кг/кг приведена на рис. 6.

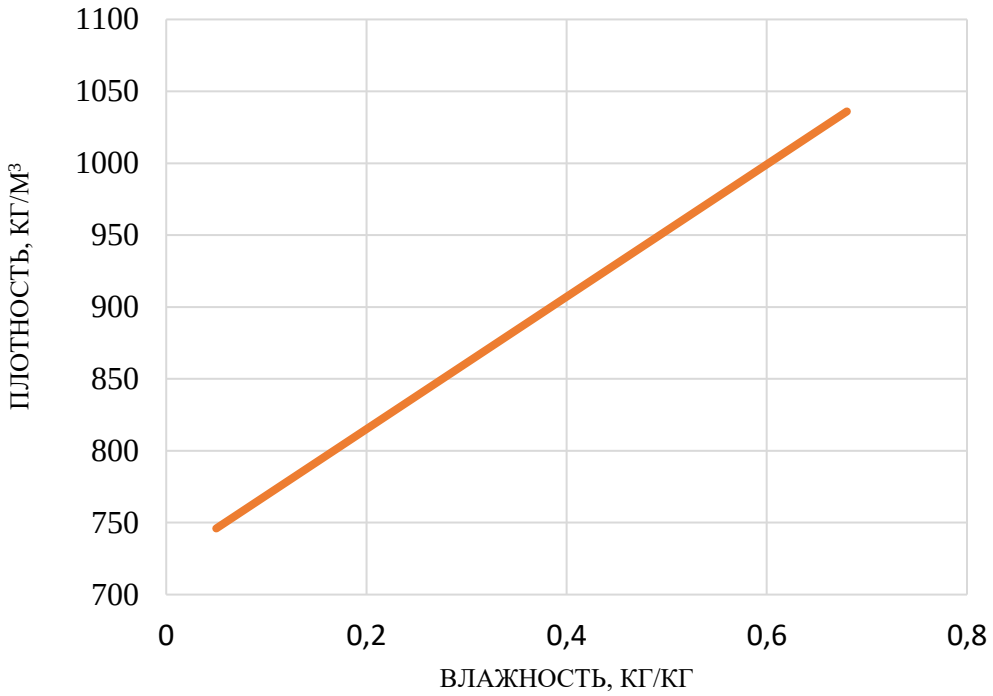

Рис. 6. Зависимость плотности печени сома от влажности. Составлено авторами
Fig. 6. Dependence of catfish liver density on humidity. Compiled by the authors

Знание плотности печени сома важно, так как от нее зависят технологические свойства получаемых в дальнейшем сухих продуктов, к тому же численное решение дифференциального уравнения, описывающего теплоперенос при влагоудалении невозможно без данных объекта сушки, к которым и относится исследуемая плотность.

Заключение

Таким образом, проведены исследования и определены значения плотности и гигроскопических свойств в технологически обоснованных рамках варьирования. Сравнение представленных результатов с известными для подобных материалов данными показывает их адекватность без противоречий, поэтому их можно успешно применять в инженерной практике пищевой индустрии.

В частности, плотность продуктов питания является косвенным показателем качества пищи, и ее изменение в зависимости от влажности позволяет выявить, например, некоторые теплофизические характеристики сырья, а именно объемную теплоемкость и температуропроводность материалов. Что касается гигроскопических свойств, а в данном случае способность исследуемым материалом поглощать влагу при фиксированных значениях относительной влажности окружающей среды, то полученные зависимости позволяют определиться с таким важным показателем сухого продукта, как его конечная влажность.

Список источников

1. Бредихин С. А., Ким И. Н., Ткаченко Т. И. Технологическое оборудование рыбоперерабатывающих производств. СПб. : Изд-во «ЛАНЬ». 2019. 744 с.

2. Bechtel P. J., Oliveira A. C. M. Chemical characterization of liver lipid and protein from cold water fish species // Journal of Food Science. 2006. Vol. 6, Is. 71. P. 480–485. DOI:10.1111/j.1750-3841.2006.00076.x.

3. Покопцева, А. А. Интенсификация тепломассопереноса при сушке гранулированной клейковины : дис. … канд. техн. наук: 4.3.3 / Покопцева Аделина Альбертовна, Астрахань, 2022. 164 с.

4. Максименко, Ю. А. Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии : дис. … доктора техн. наук: 05.12.18 / Максименко Юрий Александрович. Астрахань, 2016. 502 с.

5. Филоненко Г. К., Гришин М. А., Гольденберг Я. М. и др. Сушка пищевых растительных материалов. М. : Изд-во «Пищ. пром-сть», 1971. 440 с.

6. Лабораторная установка по исследованию различных способов сушки материалов [Электронный ресурс]. URL: https://measlab.ru/catalog/stands/protsessy-i-apparaty/laboratornaya-ustanovka-dlya issledovaniya-razlichny kh-sposobov-sushki-materialov/ (дата обращения : 30.06.2024).

7. Бредихин С. А., Бредихин А. С., Жуков В. Г. и др. Процессы и аппараты пищевой технологии. СПб. : Изд-во «ЛАНЬ», 2023. 544 с.

8. Бирман А. Р., Угрюмов С. А., Белоногова Н. А. и др. Прибор для определения плотности твердых тел // Системы. Методы. Технологии. 2020. №. 1. С. 98–101.

9. Кочанова А. С., Йсмонт Н. Г. Оценка эффективности методов определения плотности твердых тел неправильной форм // Нанотехнологии. Информация. Радиотехника (НИР-22). 2022. С. 129–133.

10. Алексанян, И. Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения: автореф. дис. ... доктора техн. наук: 05.18.12 / Алексанян Игорь Юрьевич. М., 2001. 52 с.

11. Никитина Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М. : Изд-во «Энергия», 1968. 499 с.

12. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М. : Пищ. пром-сть, 1975. 527 с.

13. Брунауэр. Адсорбция газов и паров : в 2 т. Т. 1. Физическая адсорбция; пер. с англ. / под ред. М. Н. Дубинина. М. : Госиздат иностр. лит., 1948. 784 с.

14. Тагер А. А., Цилипоткина М. В. Пористая структура полимеров и механизм сорбции // Успехи химии. 1978. Т. 47, №. 1. С. 152–175.

Информация об авторах

А. С. Яснов – аспирант 2-го года обучения кафедры «Технологические машины и оборудование», SPIN-код: 6237-8766, AuthorID: 1204341.

С. А. Бредихин – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Процессы и аппараты перерабатывающих производств», SPIN-код: 1267-3480, AuthorID: 176859.

А. Х.-Х. Нугманов – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология хранения и переработка плодоовощной и растениеводческой продукции», SPIN-код: 5934-7548, AuthorID: 561824.

И. Ю. Алексанян – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», SPIN-код: 7762-8174, AuthorID: 257277.

П. Д. Осмоловский – кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства рапса, SPIN-код: 5809-7289, AuthorID: 932977.

Information about the authors

A. S. Yasnov – Postgraduate student of the 2nd year of study at the Department of Technological Machines and Equipment, SPIN-code: 6237-8766, AuthorID: 1204341.

S. A. Bredikhin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Processes and devices of processing industries, SPIN code: 1267-3480, AuthorID: 176859.

A. H.-H. Nugmanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology of storage and processing of fruit and vegetable and crop products, SPIN-code: 5934-7548, AuthorID: 561824.

I. Y. Aleksanyan – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department Technological Machines and Equipment, SPIN-code: 7762-8174, AuthorID: 257277.

P. D. Osmolovskiy – PhD in Agricultural Sciences, Junior REsearcher at the Laboratory of breeding and seed production of rapeseed, SPIN code: 5809-7289, AuthorID: 932977.

Статья поступила в редакцию 20.09.2024; одобрена после рецензирования 01.10.2024; принята к публикации 01.10.2024.

The article was submitted 20.09.2024; approved after reviewing 01.10.2024; accepted for publication 01.10.2024.