

Научная статья

УДК 664.8.047

DOI: 10.17586/2310-1164-2023-16-2-10-38-49

Исследование гигроскопических параметров желатина из отходов переработки рыбы

Э.П. Дяченко^{1*}, Ю.А. Максименко², А.В. Макаров², В.П. Дяченко²¹Институт медицинских материалов, Россия, Москва, *amed-nauka@yandex.ru²Астраханский государственный технический университет, Россия, Астрахань

Аннотация. Исследовали гигроскопические свойства желатина, как объекта сушки, произведенного из рыбных отходов – продуктов переработки частиковых пород рыбы Астраханского региона (кожа, чешуя, кости, плавники, хрящи). Проводили анализ термодинамики внутреннего массопереноса при взаимодействии вещества указанного продукта с водой. Объектами изучения стали концентраты, полученные путем конвективно-радиационной сушки гранул желатина, предварительно вспененного до постоянной кратности и охлажденного до температуры желатинизации. Исследования проводились экспериментально-аналитически с использованием тензометрического метода Ван Бамелена. Для термодинамического анализа гигроскопических характеристик применялось классическое уравнение Гиббса–Гельмгольца. На основе эмпирических данных получены изотермы сорбции – функциональные зависимости уровня активности воды A_w от равновесной влажности и температуры продукта. Изотермы концентратов исследуемого желатина имеют S-образный характер, типичный для коллоидных капиллярно-пористых тел, что обусловлено пеноструктурой продукта. Кривые условно можно разделить на три зоны, соответствующих влаге мономолекулярной и полимолекулярной адсорбции, структурной, макрокапиллярной и микрокапиллярной влаге. По результатам анализа изотерм сорбции для исследуемого продукта определена гигроскопическая влажность желатина для различных его температур: $W_{g1} = 0,280$ кг/кг для $T = 283$ К и $W_{g2} = 0,301$ кг/кг для $T = 303$ К. Указанная влажность является пороговой для диапазона гигроскопических состояний и важной с точки зрения рационализации и моделирования тепло- и массопереноса при обезвоживании материала. В результате расчетов с использованием изотерм сорбции и уравнения Гиббса–Гельмгольца выведены зависимости свободной, связанной и внутренней энергии, а также общей удельной тепловой энергии испарения воды от влажности и температуры исследуемого продукта. Установлено, что характер указанных зависимостей для изученных образцов концентратов желатина в целом согласуется с известными опубликованными данными для ряда материалов биополимерной природы. Указанные зависимости могут быть использованы при разработке процессов обезвоживания и проектировании сушильного оборудования для получения желатиновых концентратов из рыбных отходов.

Ключевые слова: консервирование сушкой; гигроскопические параметры; термодинамический анализ; изотермы сорбции; желатин; отходы переработки рыбы

Благодарность: авторы выражают глубокую признательность доктору технических наук, профессору Игорю Юрьевичу Александяну за научное консультирование при проведении исследований

Original article

Hygroscopic parameters of gelatin from fish processing waste

Eduard P. Dyachenko^{1*}, Yuri A. Maksimenko², Alexander V. Makarov², Vyacheslav P. Dyachenko²¹Institute of Medical Materials, Moscow, Russia, *amed-nauka@yandex.ru²Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract. We studied the hygroscopic properties of gelatin from waste-products after processing of common fresh-water fish species from the Astrakhan region (skin, scales, bones, fins, and cartilage) as an object of drying. The analysis of the thermodynamics of internal mass transfer was carried out during the interaction of the substance of the specified product with water. The objects of study were concentrates obtained by convective-radiation drying of gelatin granules, previously foamed to a constant expansion ratio and cooled to the gelatinization temperature. The studies were carried out experimentally and analytically using the tensometric method by Van Bamelena. For the thermodynamic analysis of hygroscopic characteristics, classical Gibbs–Helmholtz equation was used. On the basis of empirical data, sorption isotherms were obtained – functional dependences of the level of water activity A_w on the equilibrium moisture content and temperature of the product. The isotherms of the concentrates of the studied gelatin are S-shaped, typical for colloidal capillary-porous bodies, which is due to the foam structure of the product. The curves can be conventionally subdivided into three zones, corresponding to the moisture of monomolecular and polymolecular adsorption, structural, microcapillary, and

microcapillary moisture. Based on the analysis of sorption isotherms for the product under study, the hygroscopic moisture content of gelatin was determined for its various temperatures: $W_{g1} = 0.280$ kg/kg for $T = 283$ K and $W_{g2} = 0.301$ kg/kg for $T = 303$ K. The specified moisture content is a threshold for the range of hygroscopic states and is important from the point of view of rationalization and modeling heat and mass transfer during material dehydration. As a result of calculations using sorption isotherms and the Gibbs–Helmholtz equation, the dependences of free, bound, and internal energy as well as the total specific thermal energy of water evaporation on moisture content and temperature of the product under study were derived. It has been established that the nature of these dependences for the studied samples of gelatin concentrates is generally consistent with the published data for a number of materials of a biopolymer nature. These dependencies can be used in the development of dehydration processes and in the design of drying equipment for the production of gelatin concentrates from fish waste.

Keywords: canning by drying; hygroscopic characteristics; thermodynamic analysis; sorption isotherms; gelatin; fish processing waste

Acknowledgments: the authors are deeply grateful to the Dr. Sci. (Eng.), Professor Igor Yu. Aleksanyan for scientific advice during research

Введение

Желатин является ценным полимерным продуктом и благодаря своим свойствам широко применяется в различных областях промышленности (пищевой, фармацевтической, биомедицинской, косметической и других). Желатин представляет собой белок животного происхождения. В пищевой промышленности желатиновые концентраты широко используются при производстве кондитерских изделий, мясных и рыбных консервов. Защитные свойства коллоида и эмульгирующие свойства желатина используются в продуктах, требующих стабилизации пен или жировых эмульсий. В медицинской, фармацевтической, микробиологической и косметических индустриях он применяется при производстве капсул для препаратов, кровезаменителей, шовных материалов, контактных линз, биологических клеев, питательных сред для микроорганизмов и *in vitro* диагностики, косметических препаратов, кремов и др. [1–4].

В настоящее время отечественные и зарубежные ученые активно изучают и разрабатывают оптимальные методы и способы производства желатина из альтернативного сырья, в том числе из таких твердых рыбных отходов, как кожа, кости, плавники, чешуя и хрящи [5–7]. Использование отходов рыбопереработки не только расширяет ресурсную базу производства желатина, повышает процент использования рыбного сырья, но и позволяет получать ценный продукт, обладающий уникальными свойствами [7–10]. Способность желатина при низких температурах образовывать высокопрочные термально обратимые гели привлекает все большее внимание исследователей.

Сушка – заключительная, энергоемкая и наиболее важная стадия процесса производства желатина, влияющая на качество сухого продукта и обуславливающая режимы консервации и хранения. Сегодня при производстве желатина-порошка наиболее широкое распространение получила технология сушки, основанная на применении конвективного энергоподвода. Желатиновый бульон (экстракт) сушат в ленточных сушильных установках [6, 11] в форме штранг (прядей). При этом время нахождения материала в аппарате достигает десятков часов, что делает процесс конвективной сушки длительным и существенно повышает риски деградации продукта вследствие продолжительного контакта сушильного газа с обезвоживаемым материалом. Поиск рациональных высокоинтенсивных способов сушки желатиновых бульонов требует детального изучения свойств желатина как объекта влагоудаления.

Знание характера взаимодействия между стремящихся к гигротермическому равновесному состоянию влажным газом и веществом (статика сушки) позволяет проанализировать движущую силу массообмена, перспективы применения лучистого потока энергии и диспергирования продукта как объекта сушки, подобрать условия производства и хранения сухого материала, включая тару и упаковку. Известно, что разработка рациональных способов сушки невозможна без комплексного изучения продукта как объекта влагоудаления, при этом первоочередной задачей является исследование гигроскопических характеристик, что отмечается в классических работах по теории сушки А.В. Лыкова и А.С. Гинзбурга [10].

Желатин благодаря своим коллоидно-физическим свойствам можно отнести к лиофильным коллоидным телам, в которых преобладает осмотически связанная влага, а также влага, связанная адсорбционно [10, 12]. При преобразовании желатинового раствора в гель осмотическая влага поглощается желатином, происходит иммобилизация влаги в ячейках геля. Согласно данным С.М. Липатова, доля удерживаемой желатином адсорбированной влаги достигает 30%. При получении образцов желатина установлено, что в процессе сушки происходит существенное сжатие желатина с сохранением эластичных свойств продукта. Следует отметить, что желатином поглощаются наиболее близкие по полярности жидкости, при этом преобразование ограниченно набухающего геля желатина в неограниченно набухающий гель возможно в зависимости от физических условий, например, при повышении температуры или давления [13].

Для желатина, как и для большинства влажных продуктов, при сушке происходит изменение структурно-механических, теплофизических и других свойств, при этом в диапазоне гигроскопических состояний имеют место наиболее существенные изменения. Они определяют характер процессов тепломассопереноса в продукте, качественные характеристики продукта при его обработке обезвоживанием и обусловлены молекулярным характером связи поглощенной влаги сухим скелетом продукта. В связи с этим корректная организация процесса сушки невозможна без анализа видов связи влаги с материалом при исследовании внутреннего тепломассопереноса (П.А. Ребиндер, А.В. Лыков, Б.М. Смольский, Н.В. Чураев, А.С. Гинзбург и др.) [10, 13].

В настоящее время интенсификация процесса сушки высоковлажных продуктов достигается в основном за счет ускорения внешнего теплообмена путем увеличения плотности тепловых потоков и поверхности тепломассообмена путем диспергирования продукта, создания условий, обеспечивающих более высокие скорости массообмена (псевдооживление, разрежение) и др. При этом известно, что скорость внешнего теплообмена ограничивается скоростью внутреннего тепломассопереноса.

По данным [13], значение коэффициента диффузии влаги для желатина составляет $0,56 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ при влагосодержании продукта $U = 0,30 \text{ кг/кг}$ и $0,80 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ при $U = 0,75 \text{ кг/кг}$, затем преобладание осмотической формы влаги с материалом обуславливает снижение коэффициента диффузии в диапазоне $0,75 \leq U \leq 1,10 \text{ кг/кг}$. Таким образом, учитывая незначительную величину коэффициента диффузии влаги и необходимость обработки желатина сравнительно незначительными потоками тепла (с целью исключения расплавления материала в начале процесса сушки, а также исключения деструкции термолабильных веществ в материале), эффективным путем интенсификации тепломассообменных процессов при сушке желатина и подобных желатину продуктов может являться сочетание методов управления внутренними и внешними процессами тепломассопереноса.

Цель исследования – изучение гигроскопических свойств желатина, экстрагированного из рыбных отходов, а также анализ термодинамики внутреннего массопереноса при взаимодействии концентратов указанного продукта с водой для обеспечения рациональных режимов и моделирования процесса сушки.

Объекты и методы исследования

Исследуемым продуктом был желатин, экстрагированный по изложенной в работе [14] методике, из рыбных отходов – продуктов переработки рыб частиковых пород Астраханского региона (чешуя, кожа, кости, плавники, хрящи). В качестве объектов исследования использованы концентраты, полученные путем конвективно-радиационной сушки гранул желатина, предварительно вспененного до постоянной кратности и охлажденного до температуры желатинизации.

Исследования гигроскопических характеристик и равновесной влажности концентратов желатина осуществлялись с использованием тензометрического метода Ван Бамелена, подробно описанного в работах [10, 15]. Навески концентрата (в форме слоя сухих гранул равномерно распределенного по дну чашки Петри), в количестве трех единиц, с известной массой и влажностью помещались в герметичную камеру эксикаторной емкости над водным сернокислым раствором заданной концентрации. Масса навесок, помещаемых в эксикаторную емкость, варьировалась в диапазоне $m_n = (0,0070 \pm 0,0001) \text{ кг}$. Далее эксикаторная емкость устанавливалась в термостат типа ХТ-3/70. Заданная в рабочей камере термостата температура фиксировалась посредством термометра ЛТ-300. Периодически, каждые 24 ч, указанные навески извлекались из эксикаторной емкости и взвешивались на весах модели Adventurer

ОНАУС AR3130. Отсутствие изменения массы навесок между взвешиваниями соответствовало достижению продуктом равновесной влажности и обуславливало завершение опыта. По завершении опыта осуществляли расчет равновесной влажности продукта W_p , по формуле

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

где G_1 – масса нативного образца концентрата желатина, кг;

G_2 – масса образца концентрата желатина в равновесном состоянии, кг;

$W_{\text{образца}} = 0,05$ – величина влажности нативного продукта, кг/кг.

Далее путем изменения концентрации сернокислого раствора изменялось значение относительной влажности воздуха ϕ , % внутри эксикаторной емкости (при фиксированной его температуре T , К) и осуществлялось определение равновесной влажности продукта при новом значении ϕ , % (последующий опыт). Для обеспечения $\phi = 100\%$ в камеру эксикаторной емкости загружалась дистиллированная вода. Для повышения точности измерения каждый опыт повторялся три раза. Величина влажности нативного продукта определялась по ГОСТ 25183.10-82, относительная ошибка не превышала 5%.

В таблице 1 приведены значения массы m_k , кг; концентрации C_k , % (по массе); плотности ρ_k , кг/м³ растворов серной кислоты, загружаемых в камеру эксикаторной емкости для обеспечения требуемой относительной влажности воздуха ϕ , % при заданных значениях температуры T , К. При этом объем загружаемого раствора серной кислоты (дистиллированной воды для $\phi = 100\%$) составлял $V_k = 0,0005$ м³, объем эксикаторной емкости, занимаемый паровоздушной смесью $V_{\text{п}} = 0,004$ м³.

Таблица 1. Параметры растворов серной кислоты, загружаемых в камеру эксикаторной емкости, при заданных значениях температуры T , К

Table 1. Parameters of sulphuric acid solution in the exicator chamber at prespecified temperature values T , K

$T = 283 \text{ K}$					
ρ_k , кг/м ³ (при температуре $t = 25^\circ\text{C}$)	1459	1359	1319	1185	1120
C_k , %	56,6	46,7	38,0	26,0	18,0
m_k , кг	0,7295	0,6795	0,6595	0,5925	0,56
ϕ , %	20	40	60	80	90
$T = 303 \text{ K}$					
ρ_k , кг/м ³ (при температуре $t = 25^\circ\text{C}$)	1474	1370	1288	1189	1120
C_k , %	58,0	47,8	39,0	26,7	18,0
m_k , кг	0,737	0,685	0,644	0,5945	0,56
ϕ , %	20	40	60	80	90

Следует отметить, что в замкнутом объеме эксикатора и статических условиях процесса достижения равновесной влажности величина ϕ равна уровню активности воды A_w .

Известно, что величина Θ , являющаяся потенциалом трансфера массы (влаги), применяется в решении задачи анализа явлений трансфера тепловой энергии и вещества [10, 12, 13]. Оценка Θ в паровоздушной среде возможна по величине химического потенциала μ . При этом модуль μ для материала в диапазоне гигроскопических состояний ориентировочно равен потенциалу трансфера влаги [10]

$$|\Theta| = |\mu| = R \cdot T \cdot \ln A_w,$$

где $R = 8,314$ – универсальная газовая константа, Дж/(моль·К);

T – температура среды, К.

В гигроскопическом диапазоне при постоянной температуре и относительной влажности воздуха (внутри эксикаторной емкости) равной единице химический потенциал имеет нулевую величину μ_0 , аналогично находящейся в свободном состоянии влаги. Из этого следует, что в текущем состоянии для произвольной точки образца движущей сорбционной силой является выражение $\Delta\mu = \mu - \mu_0$ [10].

При этом также известно [10], что оценку формы и энергии связи влаги с сухим продуктом возможно проводить по величине работы обратимого отделения одного моля воды при постоянной температуре среды для фиксированных влажности (W , кг/кг) и состава продукта, то есть

$$|\Delta\mu| = E_{\text{св}} = \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial W_p} \right)_T = R \cdot T \cdot \frac{p_s}{p_u} = -R \cdot T \cdot \ln A_w, \quad (1)$$

где $E_{\text{св}}$ – свободная энергия моля адсорбированной субстанции в определенной прослойке, Дж/моль;
 p_s – давление насыщенной паровой среды над плоской поверхностью воды в свободном состоянии, Па;

p_u – давление водяных паров в состоянии равновесия при аналогичной температуре над веществом определенного уровня увлажнения, Па.

Таким образом, соотношение (1) позволяет осуществить варьирование $E_{\text{св}}$ по W при математической оценке в диапазоне гигроскопических состояний.

Оценка механизма варьирования входящих в соотношение Гиббса–Гельмгольца термодинамических составляющих возможна (при неизменных давлении, температуре и объеме) путем анализа и обработки эмпирически полученных изотермических сорбционных равновесных зависимостей. Соотношение Гиббса–Гельмгольца выглядит следующим образом

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S,$$

где ΔH – изменение энтальпии;

$T \cdot \Delta S$ – изменение связанной энергии;

ΔS – изменение энтропии.

Взятие производной из соотношения Гиббса–Гельмгольца по W_p позволяет определить изменение свободной энергии при постоянных давлении, температуре и объеме

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial W_p} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta H}{\partial W_p} \right)_{T,P} - T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P}. \quad (2)$$

Взятие производной по T из выражения (2) позволяет получить следующее соотношение (изменение внутренней энергии будет равно нулю)

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial W_p} \right)_{T,P} = - \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P}. \quad (3)$$

Таким образом, с учетом (1) получаем соотношение для варьирования энтропии влаги в связанном состоянии

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} = - \frac{\partial (R \cdot T \cdot \ln A_w)}{\partial T} = -R \cdot \frac{\partial (T \cdot \ln A_w)}{\partial T}. \quad (4)$$

При этом термический эффект сорбции можно оценить, как

$$\left(\frac{\partial \Delta H}{\partial W_p} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial W_p} \right)_{T,P} + T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P}. \quad (5)$$

Для оценки удельных затрат тепловой энергии на сушку желатина из рыбных отходов (с учетом термодинамических потерь тепла в процессе обезвоживания) определяем термическую энергию $r = f(W, T)$, необходимую для удаления килограмма воды из образца [10].

Термическую энергию (общую удельную тепловую энергию испарения воды) определяем по следующему выражению

$$r = r' + r_{\text{см}} + r_{\text{энт}},$$

где r' – энергетическая составляющая образования пара из воды в свободном состоянии, Дж/кг;

$r_{\text{см}}$ – энергетическая составляющая смачивания (теплота смачивания), Дж/кг;

$r_{\text{энт}}$ – энергетическая составляющая, обусловленная варьированием энтропии (энтропийное термическое слагаемое), Дж/кг.

Известно, что в пределах $T = 283 \div 318$ К изменение теплоты образования пара из воды в свободном состоянии имеет линейный характер [10]

$$r' = 3118458,1 - 2286,66 \cdot T.$$

Слагаемое $r_{см}$ определяем как модуль дифференциала свободной энергии влагоудаления при постоянном T [10]

$$r_{см} = \left| \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial W_p} \right)_{T,P} \right| = \left| -\frac{1}{\alpha} \cdot R \cdot \ln A_w \right|, \quad (6)$$

где α – молярная масса воды, составляющая 0,018 кг/моль.

Слагаемое $r_{энт}$ определяем следующим образом

$$r_{энт} = \left| \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} \right| = \left| -\frac{1}{\alpha} \cdot R \cdot \frac{\partial(T \cdot \ln A_w)}{\partial T} \right|. \quad (7)$$

Таким образом, общая удельная тепловая энергия испарения воды r , Дж/кг определяется по следующему выражению

$$r = (3118458,1 - 2286,66 \cdot T) + \left| -\frac{1}{\alpha} \cdot R \cdot \ln A_w \right| + \left| -\frac{1}{\alpha} \cdot R \cdot \frac{\partial(T \cdot \ln A_w)}{\partial T} \right|. \quad (8)$$

Учитывая, что при построении изотерм сорбции для исследуемого материала возникает зависимость $\ln A_w$ от влажности и температуры материала, соотношения (2)–(5), (6)–(8) позволяют получить искомые зависимости энергий, в том числе общей удельной тепловой энергии испарения воды от влажности и температуры в процессе сушки.

Результаты и их обсуждение

В результате проведения экспериментов построены изотермы сорбции для исследуемого материала при $T = 283$ и 303 К. Выбор температур обусловлен особенностями процесса сушки продукта при конвективно-радиационном энергоподводе. Результат анализа изотерм сорбции свидетельствует о сложности сорбционного механизма, изменяющегося в точках перегиба кривых, что указывает на влияние на механизм того или иного вида энергии и связи удаляемой влаги с сухим материалом. Относительная ошибка при определении A_w не превышала $\varepsilon_{A_w} = 6,3\%$. Эмпирически полученные равновесные сорбционные зависимости (изотермы сорбции) для желатина, экстрагированного из рыбных отходов изображены на рисунке 1.

Путем аппроксимации эмпирических данных полиномами третьей (в диапазоне $0 \leq A_w \leq 0,8$) и второй степени (в диапазоне $0,8 \leq A_w \leq 1,0$) выведена зависимость уровня активности воды A_w от влажности и температуры концентрата желатина, экстрагированного из рыбных отходов

$$\begin{cases} A_w(W_p, T) = (a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h), & 0 \leq A_w \leq 0,8; \\ A_w(W_p, T) = (a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2), & 0,8 \leq A_w \leq 1,0, \end{cases} \quad (9)$$

где $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1, g_1, h, a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2$ – параметрические коэффициенты, значения которых приведены в таблице 2.

Позонный метод аппроксимации выбран с целью более точного математического описания кривых, величина достоверности аппроксимации составляла $R^2 = 0,999$. Зависимость (9) применима при проектировании и организации технологического процесса производства желатинового концентрата.

Кривые изотерм концентратов исследуемого желатина (рисунок 1) имеют S-образный характер, типичный для коллоидных капиллярно-пористых тел, что обусловлено пеноструктурой продукта. Кривые условно можно разделить на три зоны, соответствующие влаге мономолекулярной и полимолекулярной адсорбции, структурной, макрокапиллярной и микрокапиллярной влаге. Капиллярно-пористые коллоидные тела обладают свойствами капиллярно-пористых, а также коллоидных тел. Стенки капилляров таких тел набухают при поглощении жидкости, являются эластичными.

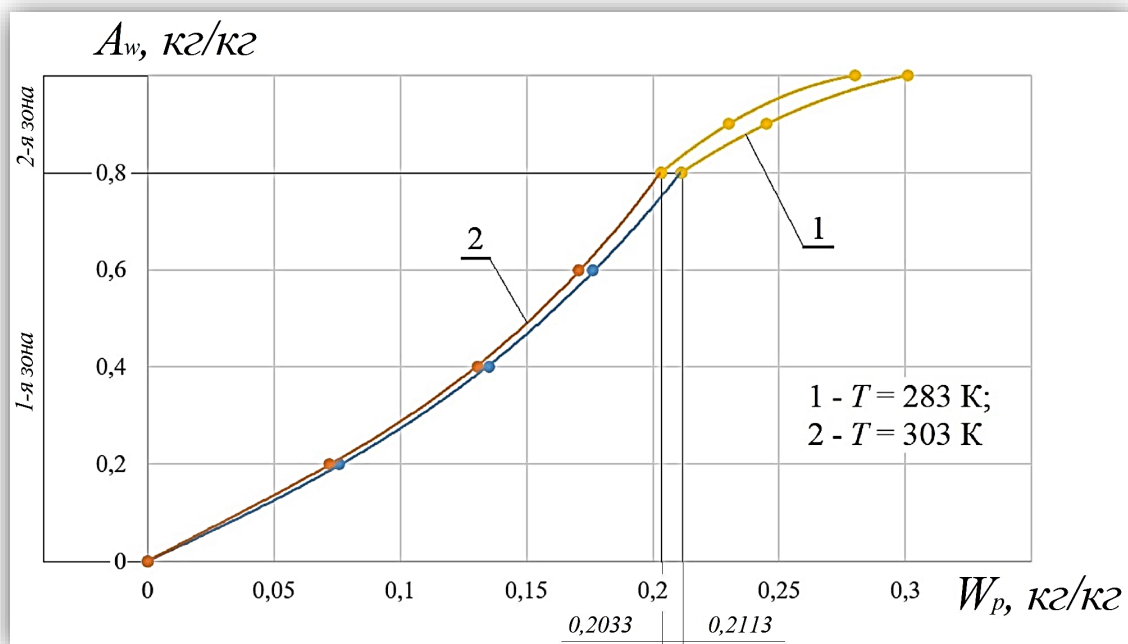


Рисунок 1 – Эмпирически полученные равновесные сорбционные зависимости (●) и их аппроксимирующие кривые (—) для желатина, экстрагированного из исследуемых рыбных отходов
 Figure 1. Empirical equilibrium sorption dependencies (●) and their approximating curves (—) for gelatin extracted from waste-products after processing of common fresh-water fish species

Таблица 2. Параметрические коэффициенты зависимости уровня активности воды A_w от влажности и температуры желатина, экстрагированного из рыбных отходов

Table 2. Parametric coefficients for the dependency of water activity level A_w on the moisture content and temperature of gelatin extracted form fish waste-products

Параметрический коэффициент	Значение параметрического коэффициента для $0 \leq A_w \leq 0,8$	Параметрический коэффициент	Значение параметрического коэффициента для $0,8 \leq A_w \leq 1,0$
a_1	-0,831	a_2	0,479
b_1	282,344	b_2	-158,338
c_1	0,198	c_2	-0,231
d_1	-60,134	d_2	79,074
e_1	-0,0185	e_2	0,0258
f_1	8,026	f_2	-8,333
g_1	0,00000306	—	—
h	-0,0006401	—	—

Совместный анализ полученных изотерм сорбции и кривых деформации для желатина с разным влагосодержанием, приведенных в работе А.В. Лыкова [16] показывает, что по завершении зоны упругопластических деформаций начинается упрочнение структуры, при которой желатин становится пористым. При появлении пор возникает преобразование структуры продукта в текстуру с равномерно распределенной жидкостью, то есть структура хаотично расположенных мицелл, содержащих большое количество осмотически захваченной влаги, около пор переходит в упорядоченную структуру с равномерно распределенной жидкостью, а часть свободной жидкости переходит в связанную. Описанное явление может быть реализовано в промышленных условиях при вспенивании нативного желатинового бульона (экстракта). Одновременно, учитывая, что коэффициенты массопереноса для капиллярно-пористых тел на 1–2 порядка выше, чем для непористых материалов, вспенивание желатина перед гелеобразованием и сушкой способствует формированию структуры сухого продукта, которая наиболее благоприятствует интенсивному внутреннему массопереносу.

По результатам анализа изотерм сорбции определены значения гигроскопической влажности исследуемого продукта W_g , кг/кг, являющейся пороговой для диапазона гигроскопических состояний и важной с точки зрения рационализации и моделирования тепломассопереноса при обезвоживании

материала. Для исследуемого продукта гигроскопическая влажность имеет следующие значения: для $T = 283 \text{ K}$ – $W_{g1} = 0,280 \text{ кг/кг}$; для $T = 303 \text{ K}$ – $W_{g2} = 0,301 \text{ кг/кг}$.

Подставив выражение (9) в соотношения (2)–(5), (8) получим искомые зависимости энергий, в том числе общей удельной тепловой энергии испарения воды от влажности и температуры в процессе сушки:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial W_p} \right)_{T,P} &= T \cdot R \cdot \ln \left((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h) \right), 0 \leq A_w \leq 0,8; \\ \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial W_p} \right)_{T,P} &= T \cdot R \cdot \ln \left((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2) \right), 0,8 \leq A_w \leq 1,0. \end{aligned} \right. ; \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} &= -T \cdot R \cdot \left[\frac{\ln \left((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h) \right) + (a_1 \cdot W_p^3 + c_1 \cdot W_p^2 + e_1 \cdot W_p + g_1)}{\left((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h) \right)} \right], 0 \leq A_w \leq 0,8; \\ T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} &= -T \cdot R \cdot \left[\frac{\ln \left((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2) \right) + (a_2 \cdot W_p^2 + c_2 \cdot W_p + e_2)}{\left((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2) \right)} \right], 0,8 \leq A_w \leq 1,0. \end{aligned} \right. ; \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} &= T \cdot R \cdot \ln \left((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h) \right) + \\ &+ \left[-T \cdot R \cdot \left[\frac{\ln \left((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h) \right) + (a_1 \cdot W_p^3 + c_1 \cdot W_p^2 + e_1 \cdot W_p + g_1)}{\left((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h) \right)} \right] \right], 0 \leq A_w \leq 0,8; \end{aligned} \right. ; \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{aligned} T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} &= T \cdot R \cdot \ln \left((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2) \right) + \\ &+ \left[-T \cdot R \cdot \left[\frac{\ln \left((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2) \right) + (a_2 \cdot W_p^2 + c_2 \cdot W_p + e_2)}{\left((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2) \right)} \right] \right], 0,8 \leq A_w \leq 1,0. \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} r_{cm} &= \left| -55,556 \cdot R \cdot \ln \left((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h) \right) \right|, 0 \leq A_w \leq 0,8; \\ r_{cm} &= \left| -55,556 \cdot R \cdot \ln \left((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2) \right) \right|, 0,8 \leq A_w \leq 1,0. \end{aligned} \right. ; \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} r_{\text{sum}} &= \left| -55,556 \cdot R \cdot \left[\frac{\ln \left((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h) \right) + (a_1 \cdot W_p^3 + c_1 \cdot W_p^2 + e_1 \cdot W_p + g_1)}{\left((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h) \right)} \right] \right|, 0 \leq A_w \leq 0,8; \\ r_{\text{sum}} &= \left| -55,556 \cdot R \cdot \left[\frac{\ln \left((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2) \right) + (a_2 \cdot W_p^2 + c_2 \cdot W_p + e_2)}{\left((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2) \right)} \right] \right|, 0,8 \leq A_w \leq 1,0. \end{aligned} \right. ; \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & r = (3118458,1 - 2286,66 \cdot T) + \\ & + \left| -55,556 \cdot R \cdot \ln((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h)) \right| + \\ & + \left| -55,556 \cdot R \cdot \left[\ln((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h)) + \right. \right. \\ & \left. \left. + T \cdot \frac{((a_1 \cdot W_p^3 + c_1 \cdot W_p^2 + e_1 \cdot W_p + g_1))}{((a_1 \cdot T + b_1) \cdot W_p^3 + (c_1 \cdot T + d_1) \cdot W_p^2 + (e_1 \cdot T + f_1) \cdot W_p + (g_1 \cdot T + h))} \right] \right|, 0 \leq A_w \leq 0,8; \\ & r = (3118458,1 - 2286,66 \cdot T) + \\ & + \left| -55,556 \cdot R \cdot \ln((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2)) \right| + \\ & + \left| -55,556 \cdot R \cdot \left[\ln((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2)) + \right. \right. \\ & \left. \left. + T \cdot \frac{((a_2 \cdot W_p^2 + c_2 \cdot W_p + e_2))}{((a_2 \cdot T + b_2) \cdot W_p^2 + (c_2 \cdot T + d_2) \cdot W_p + (e_2 \cdot T + f_2))} \right] \right|, 0,8 \leq A_w \leq 1,0. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

На рисунке 2 приведены зависимости свободной, связанной и внутренней энергии в зависимости от влажности исследуемого желатина, построенные с использованием выражений (10)–(15).

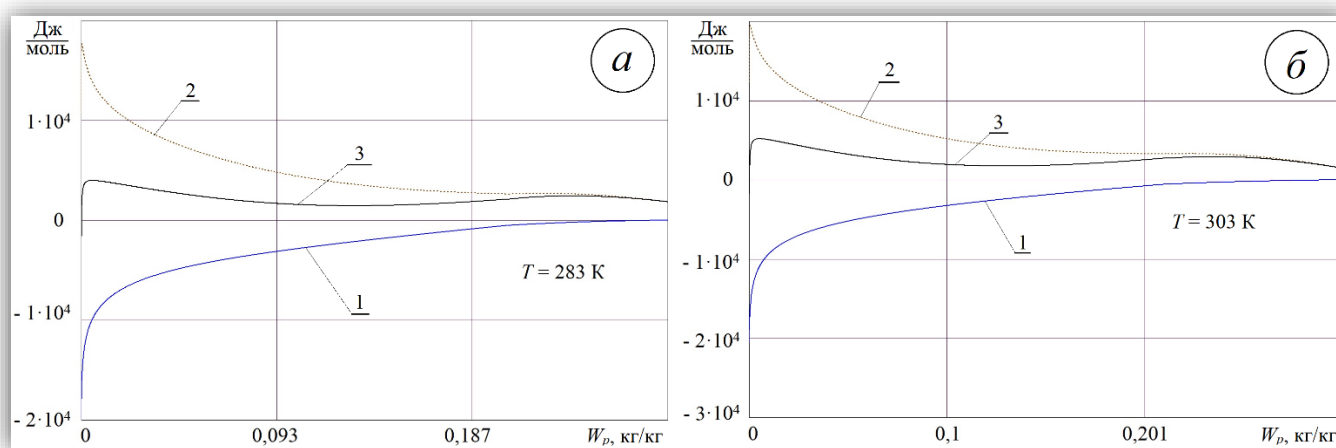


Рисунок 2 – Изменение свободной (1), связанной (2) и внутренней энергии (3) в зависимости от влажности исследуемого желатина

Figure 2. Variation of free (1), bound (2) and internal (3) energy depending on the moisture content of the studied gelatin

Переход системы к термодинамическому равновесию во всем диапазоне W_p обуславливается величиной и характером энтропийной составляющей. Установлено, что энтропийная составляющая практически во всем диапазоне влажности имеет отрицательную величину, что обусловлено термоэффектами при сорбционной структуре. Следует отметить, что характер варьирования всех энергетических составляющих соотношения Гиббса–Гельмгольца для исследованных образцов концентратов желатина в целом согласуется с данными для ряда материалов биополимерной природы [17–21]. Имеющиеся некоторые расхождения между отдельными данными, например, представленными в работе [13], можно объяснить, как зависимостью гигроскопических свойств желатина от технологии его производства, так и различием методов их определения.

На рисунке 3 приведены зависимости общей удельной тепловой энергии испарения воды от влажности исследуемого желатина, экстрагированного из рыбных отходов.

Характер рассчитанной на основе эмпирических данных зависимости $r(W_p, T)$ также согласуется с известными аналогичными данными для ряда продуктов биополимерной природы и обуславливается характерным для каждой зоны тем или иным видом энергии и связи влаги с сухим скелетом исследуемого вещества.

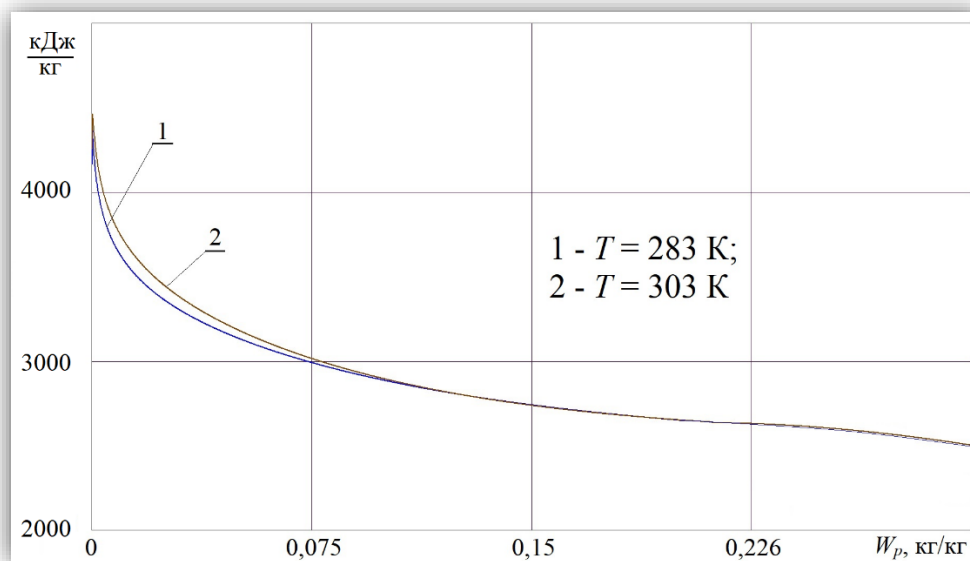


Рисунок 3 – Зависимости общей удельной тепловой энергии испарения воды от равновесной влажности для различных температур исследуемого желатина

Figure 3. Dependency of total specific thermal energy of water evaporation on equilibrium moisture content for various temperatures of the studied gelatin

Выводы

В ходе исследований изучены гигроскопические свойства желатина, экстрагированного из рыбных отходов – продуктов переработки рыбы частиковых пород, а также выполнен анализ термодинамики взаимодействия концентратов исследуемого продукта с водой с целью усовершенствования и рациональной организации процесса сушки желатинового экстракта. Получены функциональные зависимости свободной, связанной и внутренней энергии, общей удельной тепловой энергии испарения воды от влажности и температуры исследуемого продукта.

Установлено, что характер указанных зависимостей для исследованных образцов концентратов желатина в целом согласуется с известными аналогичными данными для ряда продуктов биополимерной природы. По результатам анализа изотерм сорбции для исследуемого продукта определены значения гигроскопической влажности, имеющие следующие значения при $T = 283$ К и $T = 303$ К, соответственно: $W_{g1} = 0,280$ кг/кг; $W_{g2} = 0,301$ кг/кг. В качестве итоговой величины для хранения целесообразно принимать величину влажности продукта в объеме от 5 до 7%, поскольку при влажности $W_p = 0,05$ кг/кг микробиологическая и ферментативная активность в исследуемом желатине минимальна. При разработке и моделировании рациональных способов сушки и сушильной техники целесообразно обратить внимание, что в диапазоне гигроскопических состояний, в котором в основном происходит обезвоживание материала биополимерного происхождения, существенное влияние на кинетику процесса влагоудаления оказывают характер связывания влаги и ее энергетическое состояние. Результаты исследований, включая зависимости от влияющих параметров, рекомендуется применять при разработке способов сушки и проектировании сушильной техники для получения сухого желатина из рыбных отходов.

Литература

1. Мехедькин А.А. Структура рынка желатина в Российской Федерации // Управление рисками в АПК. 2020. № 3. С. 63–68.
2. Просеков А.Ю., Ворошилин Р.А. Производство желатина — состояние и перспективы рынка, альтернативные источники, технологии производства // Все о мясе. 2020. № 5S. С. 265–268. DOI: 10.21323/2071-2499-2020-5S-265-268
3. Wangtueai S., Noomhorm A. Processing optimization and characterization of gelatin from lizardfish (*Saurida* spp.) scales. *LWT – Food Sci. Technol.* 2009, V. 42, Is. 4, pp. 825–834. DOI: 10.1016/j.lwt.2008.11.014

4. Молохова Е.И., Пономарева Е.И., Сорокина Ю.В., Алексеева И.В., Рюмина Т.Е., Новикова В.В., Голованенко А.Л., Березина Е.С., Ладутько А.М. Экспериментальное обоснование состава желатиновой массы для получения капсул с эфирными маслами // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2021. Т. 10. № 4. С. 63–68. [https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-4\(1\)-63-68](https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-4(1)-63-68)
5. Ворошилин Р.А., Махамбетов Э.М., Проせков А.Ю. Анализ влияния параметров распылительной сушки на свойства желатина // Все о мясе. 2022. № 2. С. 22–26. DOI: 10.21323/2071-2499-2022-2-22-26
6. Макаров А.В., Максименко Ю.А., Дяченко Э.П. Исследование конвективно-радиационной сушки вспененного желатинового бульона из отходов переработки рыбы // Техника и технология пищевых производств. 2019. Т. 49. № 4. С. 594–603. DOI: 10.21603/2074-9414-2019-4-594-603
7. Cao T.H., Nguyen T.T.O., Nguyen T.M.H., Le N.T., Razumovskaya R.G. Characteristics and physicochemical properties of gelatin extracted from scales of seabass (*Lates calcarifer*) and grey mullet (*Mugil cephalus*) in Vietnam. *J. Aquat. Food Prod. Technol.* 2017, V. 26, Is. 10, pp. 1293–1302. DOI: 10.1080/10498850.2017.1390026
8. Муханова М.А., Свирина С.А., Бекешева А.А., Якубова О.С., Максименко Ю.А. Перспективы применения вторичных коллагенсодержащих ресурсов толстолобика в пищевых системах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии, 2021. Т. 9. № 4. С. 44–53. DOI: 10.14529/food210406
9. Новикова С.П., Салохединова Р.Р., Низова Н.В., Орлова А.А., Рогальская Е.А., Зубко А.В., Якубова О.С., Бокерия Л.А., Голухова Е.З. Сравнительная доклиническая оценка биодеградируемых пленочных композиций на основе желатина разного происхождения для имплантируемых медицинских изделий // Биофармацевтический журнал. 2022. Т. 14. № 2. С. 33–39. DOI: 10.30906/2073-8099-2022-14-2-33-39
10. Алексанян И.Ю., Буйнов А.А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование. Астрахань: Изд-во Астраханского гос. техн. ун-та, 2004. 380 с.
11. Gelatin handbook. Gelatin Manufacturers Institute of America, 2019. 26 p.
12. Максименко Ю.А. Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Астрахань, 2016.
13. Никулин В.И. Усовершенствование процесса сушки желатина: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1981.
14. Дяченко Э.П., Максименко Ю.А., Макаров А.В., Као Т.Х. Способ сушки желатинового бульона при производстве сухого желатина: пат. 2757785 Российская Федерация. 2021. Бюл. № 30.
15. Никитина Л.М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М.: Энергия, 1968. 500 с.
16. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 471 с.
17. Андреева Е.В., Евсеева С.С., Нугманов А.Х.Х., Алексанян И.Ю. Гигроскопические параметры рафината как объекта обезвоживания после экстракции красящих компонентов из плодовоовощного сырья // Индустрия питания. 2021. Т. 6. № 1. С. 75–82. DOI: 10.29141/2500-1922-2021-6-1-9
18. Нгуен Т.С., Нугманов А.Х.-Х., Арабова З.М., Нугманова А.А. Вычисление энергии на испарение связанной влаги из джекфрута // Известия КГТУ. 2019. № 55. С. 214–225.
19. Iglesias H.A. *Handbook of food isotherms: Water sorption parameters for food and food components*. Academic Press. 2012. 347 p.
20. Нугманов А.Х.Х., Мещерякова Г.С., Лебедев В.А., Алексанян И.Ю., Аджей Д.Й. Термодинамический анализ статических закономерностей влагопоглощения биополимером на базе его гигроскопических характеристик // Известия КГТУ. 2022. № 65. С. 52–65. DOI 10.46845/1997-3071-2022-65-52-65
21. Андреева Е.В., Евсеева С.С., Алексанян И.Ю., Нугманов А.Х.-Х. Гигроскопические свойства водорастворимых антоциановых комплексов, выделяемых из плодово-ягодного сырья // Вестник Международной академии холода. 2020. № 4. С. 45–52. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-45-52

References

1. Mekhedkin A.A. The structure of the gelatin market in the Russian Federation. *Upravlenie riskami v APK*. 2020, no. 3, pp. 63–68. (In Russian)
2. Prosekov A.Yu., Voroshilin R.A. Gelatin production — market status and prospects, alternative sources, production technologies. *Vse o myase*. 2020, no. 5S, pp. 265–268. DOI: 10.21323/2071-2499-2020-5S-265-268. (In Russian)
3. Wangtueai S., Noomhorm A. Processing optimization and characterization of gelatin from lizardfish (*Saurida* spp.) scales. *LWT – Food Sci. Technol.* 2009, V. 42, Is. 4, pp. 825–834. DOI: 10.1016/j.lwt.2008.11.014
4. Molokhova E.I., Ponomareva E.I., Sorokina Yu.V., Alekseeva I.V., Ryumina T.E., Novikova V.V., Golovanenko A.L., Berezina E.S., Ladutko Yu.M. Experimental substantiation of the composition of gelatin mass for obtaining capsules with essential oils. *Drug Development & Registration*. 2021, V. 10, Is. 4, pp. 63–68. [https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-4\(1\)-63-68](https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-4(1)-63-68). (In Russian)
5. Voroshilin R.A., Mahambetov E.M., Prosekov A.Yu. Analyzing an effect of spray drying parameters on gelatin properties. *Vse o myase*. 2022, no. 2, pp. 22–26. DOI: 10.21323/2071-2499-2022-2-22-26. (In Russian)

6. Makarov A.V., Maksimenko Yu.A., Dyachenko E.P. Convective-radiation drying of foamed gelatin fish broth. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019, V. 49, no. 4, pp. 594–603. DOI: 10.21603/2074-9414-2019-4-594-603. (In Russian)
7. Cao T.H., Nguyen T.T.O., Nguyen T.M.H., Le N.T., Razumovskaya R.G. Characteristics and physicochemical properties of gelatin extracted from scales of seabass (*Lates calcarifer*) and grey mullet (*Mugil cephalus*) in Vietnam. *J. Aquat. Food Prod. Technol.* 2017, V. 26, Is. 10, pp. 1293–1302. DOI: 10.1080/10498850.2017.1390026
8. Mukhanova M.A., Svirina S.A., Bekesheva A.A., Iakubova O.S., Maksimenko Yu.A. Prospects for the use of secondary collagen-containing resources of silver carp in food technologies. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*. 2021, V. 9, no. 4, pp. 44–53. DOI: 10.14529/food210406. (In Russian)
9. Novikova S.P., Salokhedina R.R., Nizova N.V., Orlova A.A., Rogalskaya E.A., Zubko A.V., Yakubova O.S., Bockeria L.A., Golukhova E.Z. Comparative preclinical evaluation of biodegradable film compositions based on gelatin of different origin for implantable medical devices. *Russian Journal of Biopharmaceuticals*. 2022, V. 14, no. 2, pp. 33–39. DOI: 10.30906/2073-8099-2022-14-2-33-39. (In Russian)
10. Aleksanyan I.Yu., Buynov A.A. *High intensity food drying. Foam dryer. Theory. Practice. Modeling*. Astrakhan, Astrakhan State Technical University Publ., 2004. 380 p. (In Russian)
11. *Gelatin handbook*. Gelatin manufacturers institute of America. GMIA. 2019. 26 p.
12. Maksimenko Yu.A. Development of scientific and practical foundations and improvement of drying processes of plant materials in a dispersed state. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Astrakhan, 2016, 502 p. (In Russian)
13. Nikulin V.I. Improving the gelatin drying process. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow, 1981, 24 p. (In Russian)
14. Dyachenko E.P., Maksimenko Yu.A., Makarov A.V., Cao T.H. Method for drying gelatin broth in the production of dry gelatin. *Patent RF*, no. 2757785. 2021.
15. Nikitina L.M. *Thermodynamic parameters and mass transfer coefficients in wet materials*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 500 p. (In Russian)
16. Lykov A.V. *Drying theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 471 p. (In Russian)
17. Andreeva E.V., Evseeva S.S., Nugmanov A.H.-H., Aleksanian I.Yu. Hygroscopic parameters of raffinate as an object of dehydration after extraction of coloring components from fruit and vegetable raw materials. *Food Industry*. 2021, V. 6, no. 1. pp. 75–82. DOI: 10.29141/2500-1922-2021-6-1-9. (In Russian)
18. Nguyen Thi Sen, Nugmanov A.H.-H., Arabova Z.M., Nugmanova A.A. Calculation of energy for evaporation of related moisture of jackfruit. *KSTU News*. 2019, no. 55, pp. 214–225. (In Russian)
19. Iglesias H.A. *Handbook of food isotherms: Water sorption parameters for food and food components*. Academic Press. 2012. 347 p.
20. Nugmanov A.Kh.-Kh., Meshcheryakova G.S., Lebedev V.A., Aleksanyan I.Yu., Adzhey D.Y. Thermodynamic analysis of the static patterns of moisture absorption by a biopolymer based on its hygroscopic characteristics. *KSTU News*. 2022, no. 65, pp. 52–65. DOI: 10.46845/1997-3071-2022-65-52-65. (In Russian)
21. Andreeva E.V., Evseeva S.S., Alexanyan I.Yu., Nugmanov A.H.-H. Hygroscopic properties of water-soluble anthocyanin complexes isolated from fruit and berry raw materials. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2020, no. 4, pp. 45–52. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-45-52. (In Russian)

Информация об авторах

Эдуард Павлович Дяченко – канд. техн. наук, старший аналитик
Юрий Александрович Максименко – д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе и инновациям
Александр Викторович Макаров – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии товаров и товароведения
Вячеслав Павлович Дяченко – аспирант кафедры технологических машин и оборудования

Information about the authors

Eduard P. Dyachenko, Ph.D. (Eng.), Lead Analyst
Yuri A. Maksimenko, D. Sci. (Eng.), Associate Professor, Vice-Rector for Research and Innovation
Alexander V. Makarov, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technology of Goods and Commodity Science
Vyacheslav P. Dyachenko, Postgraduate Student of the Department of Technological Machines and Equipment

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 27.03.2023
Одобрена после рецензирования 02.06.2023
Принята к публикации 03.06.2023

The article was submitted 27.03.2023
Approved after reviewing 02.06.2023
Accepted for publication 03.06.2023