

Исследование конвективно-радиационной сушки вспененного желатинового бульона из отходов переработки рыбы

А. В. Макаров¹, Ю. А. Максименко^{1,*}, Э. П. Дяченко²



¹ ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16

² Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства»,

Дата поступления в редакцию: 28.03.2019
Дата принятия в печать: 15.11.2019

140153, Россия, Московская область, Раменский район, д. Верея

*e-mail: amxs1@yandex.ru



© А. В. Макаров, Ю. А. Максименко, Э. П. Дяченко, 2019

Аннотация.

Введение. Учитывая структурно-механические и пеноструктурные свойства желатинового бульона, перспективным направлением совершенствования процесса получения сухого желатина является предварительное вспенивание продукта и применение инфракрасного (радиационного) энергоподвода в процессе его обезвоживания.

Объекты и методы исследования. Для оценки эффективности предлагаемого метода сушки проведены сравнительные исследования кинетики и интенсивности конвективной и конвективно-радиационной пеносушки желатинизированного желатинового бульона, приготовленного из отходов разделки рыбы.

Результаты и их обсуждение. Разработан способ конвективно-радиационной пеносушки желатинового бульона. Определены рациональные режимы процесса, при которых достигается максимальный удельный выход сухого желатина 0,998 кг/(м²·ч), в том числе: начальная концентрация сухих веществ в продукте $C = 0,24$ кг/кг; температура $T = 292-295$ К, влажность $W = 50-60$ % и скорость сушильного агента $v = 4-5$ м/с; начальный диаметр штранга пены $d_n = 0,004$ м; плотность теплового потока, падающего с одной стороны штранга $E = 2,45$ кВт/м², длина волны инфракрасных излучателей $\lambda = 1,01-1,11$ мкм. Получены зависимости удельного выхода сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности сушильного аппарата в единицу времени от основных влияющих на процесс сушки факторов. Установлено, что введение радиационного энергоподвода в процесс конвективной пеносушки желатина при рациональных режимах практически в три раза увеличивает удельную производительность процесса. Получены функциональные зависимости скорости сушки штранг вспененного желатинового бульона от концентрации сухих веществ в продукте (C , кг/кг) для рассмотренных режимов реализации процесса. По результатам анализа тепломассопереноса при конвективно-радиационной пеносушке желатинизированного бульона установлено, что характер изменения скорости сушки продукта типичен для большинства биополимеров.

Выводы. Результаты применимы при проектировании сушильной техники для получения сухого желатина и подобных ему по комплексу свойств продуктов.

Ключевые слова. Коллаген, гель, инфракрасное излучение, пенослой, воздух, кинетика, штранг, стержень пены, тепломассообмен, сушка

Для цитирования: Макаров, А. В. Исследование конвективно-радиационной сушки вспененного желатинового бульона из отходов переработки рыбы / А. В. Макаров, Ю. А. Максименко, Э. П. Дяченко // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 4. – С. 594–603. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-594-603>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Convective-Radiation Drying of Foamed Gelatin Fish Broth

A.V. Makarov¹, Yu.A. Maksimenko^{1,*}, E.P. Dyachenko²

¹ Astrakhan State Technical University,
16, Tatischeva Str., Astrakhan, 414056, Russia

² All-Russia Horticulture Research Institute –



Abstract.

Introduction. The mechanical characteristics of foam gelatin broth make it a promising material for studying the process of obtaining dry gelatin. The preliminary foaming of the product and the use of infrared (radiation) energy supply during its dehydration can significantly improve the process.

Study objects and methods. The research featured gelatinized gelatin broth prepared from fish wastes. The efficiency of the proposed drying method was assessed by comparative studies of the kinetics and intensity of convective and convective-radiation foam drying. Specific productivity of the process was selected as evaluation criterion.

Results and discussion. The paper introduces a method of convective radiation foam drying of gelatinized fish broth. A set of experiments made it possible to define the optimal process conditions with the maximum yield of dry gelatin, i.e. 0.998 kg/(m²·h): initial concentration of solids in the product $C = 0.24$ kg/kg; temperature $T = 292$ – 295 K, humidity $W = 50$ – 60% ; the speed of the drying agent $v = 4$ – 5 m/s; the initial diameter of the foam rod $d_f = 0,004$ m; the density of the heat flux incident on one side of the rod $E = 2.45$ kW/m²; the wavelength of infrared emitters $\lambda = 1.01$ – 1.11 microns. The research revealed the effect of the main factors influencing the drying process on the approximating dependences of the specific yield of dry gelatin from a unit area of the working surface per unit of time. The introduction of radiation energy supply into the process of convective foam drying of gelatinized broth under rational conditions was three times as high as the specific productivity of the process. An analysis of the kinetics of convective and convective-radiation drying helped to obtain some functional dependences of the drying speed of the foamed gelatin broth extrusions from the concentration of dry substances in the product for the considered process conditions. An analysis of heat and mass transfer during convective-radiation foam drying was performed using the velocity curves. The nature of the change in the drying rate of the product proved typical of most biopolymers.

Conclusion. The results obtained are applicable in the calculations of the productivity of drying equipment in dry gelatin production and other products with similar complex properties.

Keywords. Collagen, gel, infrared radiation, foam layer, air, kinetics, strang, foam rod, heat and mass transfer, drying

For citation: Makarov AV, Maksimenko YuA, Dyachenko EP. Convective-Radiation Drying of Foamed Gelatin Fish Broth. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(4):594–603. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-594-603>.

Введение

Желатин на сегодняшний день остается одним из наиболее востребованных в различных отраслях промышленности коллагенов. Основную долю на отечественном рынке желатина занимает импортная продукция. Для создания и развития новых производств желатина необходимы разработка и внедрение научно обоснованных ресурсо- и энергосберегающих технических решений, позволяющих исключить зависимость существующих технологий производства желатина от сырья. Таким образом, совершенствование технологических процессов производства желатина на основе отходов рыбопереработки является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит усовершенствовать существующие и создать новые промышленные производства желатина из нетрадиционного коллагенсодержащего сырья.

Сушка – заключительная стадия производства сухого желатина, характеризующаяся сравнительно высокой энергоемкостью и определяющая качество сухого продукта. Традиционно желатиновый бульон сушат в желатинизированном состоянии в форме слоя (пластин или прядей) на рабочей поверхности сушилки при конвективном энергоподводе с применением комбинированных режимов сушки,

а также распылительной сушки [1–4]. Однако длительность процесса конвективной сушки может достигать нескольких суток, что, наряду с использованием воздуха в качестве сушильного агента, существенно увеличивает риски порчи продукта и накладывает ряд технологических ограничений на процесс. Принимая во внимание данный факт, интенсификация процесса сушки желатинового бульона, в том числе посредством внедрения новых подходов к его реализации, является актуальным направлением исследований.

Объекты и методы исследования

Учитывая структурно-механические и пеноструктурные характеристики желатинового бульона, в том числе из отходов переработки, перспективным направлением совершенствования процесса получения сухого желатина является радиационная сушка во вспененном состоянии [5–12]. Вспенивание исходного продукта при соблюдении условий стабильности пенослоя существенно интенсифицирует процесс за счет увеличения поверхности тепломассообмена. При этом уменьшается адгезия продукта к рабочей поверхности сушилки, улучшается съем сухого продукта, сокращается интенсивность засорения сушилок, а

также энергозатраты на дробление сухого желатина [9–13]. Объемный радиационный энергоподвод, в сравнении с традиционными методами, также обладает рядом преимуществ, способствующих энерго- и ресурсосбережению, упрощению аппаратного оформления процесса [9, 10, 14–17]. Например:

- обеззараживание продукта, в частности воздействие на продукт радиационным излучением, позволяет снизить микробную обсемененность продукта;
- наиболее равномерный прогрев продукта, что обуславливается выделением тепла в объеме высушиваемого материала;
- практически абсолютный расход подведенной к объекту сушки энергии на его нагрев ввиду отсутствия тепловых потерь;
- сравнительная простота конструкции и малая металлоемкость сушильных аппаратов;
- сравнительно низкие удельные энергозатраты.

Результаты и их обсуждение

В результате предварительных исследований конвективно-радиационной сушки пеносля желатинового студня с влажностью 75 % и толщиной 4 мм на алюминиевой полированной подложке установлено, что облучаемая и омываемая воздухом поверхность образца стеклется в начале процесса, преобразуясь в материал, трудно поддающийся механическому разрушению. При этом сердцевина и контактирующая с подложкой поверхность образца оставались влажными. Сердцевина на 20–40 минутах сушки оставалась жидкой, а контактирующая с подложкой поверхность упругой. При продолжении процесса между подложкой и образцом образовывался конденсат. Влага скапливалась в месте наименьшего сопротивления – на поверхности контакта образца с подложкой. Примечательно, что при сушке синтетического ПАВ (сульфонола) в сердцевине пеносля ПАВ происходило накопление пара (парниковый эффект), который затем прорывался через оболочку (внешний стеклованный слой) [11]. В случае обезвоживания вспененного раствора желатина разрыв оболочки паром невозможен. Давление пара внутри продукта недостаточно для разрыва подсохшей поверхности образца, которая обладает существенно большей прочностью и эластичностью, чем у пеносля сульфонола [7, 8, 11].

Таким образом, учитывая физико-механические свойства желатина, для интенсификации процесса сушки целесообразно организовать объемный конвективно-радиационный энергоподвод. При этом для равномерности обезвоживания материала образцы подаваемого на сушку продукта целесообразно изготавливать в форме штранг (круглого, прямоугольного или квадратного сечения). Например, путем экструзии или разрезания желатинизированного пеносля.

Целью настоящих исследований являлась разработка рациональных режимов сушки желатинового бульона на основе изучения кинетики и интенсивности сушки при различных условиях протекания процесса. С учетом литературных данных, а также предварительных экспериментальных данных для исследования конвективно-радиационной сушки вспененного желатинового бульона в желатинизированном состоянии из отходов переработки рыб были выбраны следующие варианты реализации процесса [1–8, 10, 14–18]:

- в форме штранг круглого сечения при объемном конвективном энергоподводе;
- в форме штранг круглого сечения при объемном конвективно-радиационном энергоподводе.

Для проведения исследований использовались вероятностно-статистические методы планирования и обработки эмпирических данных, исследования проводились по полному многофакторному многоуровневому плану. Для уточнения влияния отдельных факторов на интенсивность процесса обезвоживания все второстепенные параметры были зафиксированы, а в качестве целевой функции был выбран съем (выход) сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности сушильного аппарата в единицу времени, G , кг/(м²·ч) [10, 19]:

$$G = M_{cn} / (F \cdot \tau) \quad (1)$$

где M_{cn} – масса высушенного продукта до конечной влажности не более $w_k = 0,1$ кг/кг, выбор которой осуществлен на основе результатов анализа гигроскопических характеристик продукта;

F – площадь рабочей поверхности, занимаемой продуктом, м²;

τ – экспериментальное время сушки, ч.

В таблице 1 представлены основные факторы, влияющие на интенсивность процесса конвективной пеносушки желатинового бульона, а также уровни их варьирования, установленные в результате предварительных исследований. К указанным факторам относятся: начальная концентрация сухих веществ в продукте (C , кг/кг); начальный диаметр штранга пены (d_n , м); температура (T_e , К), влажность (W , кг/кг) и скорость сушильного агента (воздуха) (v , м/с).

Исследования проводились с использованием лабораторного оборудования ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Для проведения исследований желатиновый бульон готовился по методике, приведенной в работе [20], из отходов переработки рыб частиковых пород Астраханского региона (кожа, чешуя, кости, плавники, хрящи), полученных при разделке. Бульон, предварительно вспененный до образования пены с максимальной кратностью, экструдировали в форме штранг круглого сечения диаметром d_n , мм. Поступавшие из фильер экструдера штранги желатинизировали, затем закрепляли в специальном

Таблица 1. Уровни варьирования факторов при конвективно-радиационной пеносушке желатинового бульона

Table 1. Levels of variation of factors in convective-radiation foam drying of gelatin broth

Уровень	Факторы						
	d_n , м	C , кг/кг	E , кВт/м ²	W , %	λ , мкм	ν , м/с	T_0 , К
1	0,003	0,16	0,95	50–60	1,01–1,11	4–5	292–295
2	0,004	0,20	2,45	–	–	–	–
3	0,005	0,24	–	–	–	–	–

держателе в сушильной камере лабораторной конвективно-радиационной сушилке параллельно потоку воздуха. Полученные таким образом экспериментальные образцы сушили до конечной влажности, не превышающей $w_k = 0,1$ кг/кг. Для получения кривых сушки держатель с образцом периодически взвешивали.

В результате экспериментальных исследований установлено следующее.

Существенное влияние на интенсивность сушки оказывает начальная концентрация сухих веществ в желатиновом бульоне, варьируемая, исходя из данных о пеноструктурных, структурно-механических и теплофизических характеристиках, в пределах $C = 14–26$ %. При концентрации сухих веществ $C = 26$ % пена обладает стабильностью, достаточной для реализации процесса влагоудаления без предварительного подсушивания. Превышение значения $C = 26$ % не целесообразно из-за увеличения длительности упаривания желатинового бульона, ухудшения его качественных характеристик и увеличения энергозатрат на реализацию процесса. Нижний предел $C = 14$ % обусловлен резким снижением стабильности стержня пены, что приводит к его разрушению в процессе сушки.

Диапазон изменения диаметра стержня пенослоя (штранга) желатинового бульона $d_j = 3–5$ мм обусловлен обеспечением стабильности пены в процессе сушки. Формирование диаметра менее 3 мм технически трудноосуществимо и нецелесообразно из-за резкого снижения выхода сухого желатина. Увеличение диаметра более 5 мм приводит к снижению производительности процесса, а также к локальному поверхностному расплавлению и последующему стеклованию высушиваемого продукта при сохранении влаги в центре штранга и, как следствие, ухудшению качества сухого желатина.

Пена желатинового бульона в начале процесса сушки сохраняет стабильность исключительно в желатинизированном состоянии (в состоянии студня). При этом применение только радиационного энергоподвода (без конвективного) в процессе пеносушки затруднительно в силу неконтролируемого резкого повышения температуры продукта и, как следствие, последующего плавления и разрушения пены. Применение в процессе сушки воздуха, как охлаждающего агента, температура которого не превышает температуру желатинизации

($T = 292–295$ К), а также выдерживание плотности теплового потока инфракрасного облучения, падающего с одной стороны стержня в диапазоне $E = 0,95–2,45$ кВт/м², позволяют стабилизировать температуру высушиваемого пенослоя на уровне, не превышающем температуру его плавления. Уменьшение плотности теплового потока менее 0,95 кВт/м² нецелесообразно из-за резкого сокращения выхода сухого продукта. Увеличение плотности теплового потока ($E > 2,45$ кВт/м²) приводит к локальному плавлению и разрушению пенослоя. Для обеспечения максимальной эффективности использования энергии излучателей (инфракрасных генераторов) длина волны излучения должна соответствовать максимальной излучательной способности радиационных излучателей [10, 21].

Оптимальный диапазон длины волны инфракрасных излучателей (инфракрасных генераторов) $\lambda = 1,01–1,11$ мкм, соответствующий максимальной интенсивности излучения, определяющей напряжение на генераторах $U = 220$ В и максимальной пропускательной способности продукта, выбран с учетом оптических и терморрадиационных характеристик вспененного бульона желатина [10, 21]. Использование генераторов КГТ-220-1000 в качестве инфракрасных излучателей в процессе сушки вспененного раствора желатина в равных условиях более эффективно, в сравнении с аналогами, например, нихромовыми спиралями в кварцевых трубках, при одних и тех же тепловых потоках [10, 16, 17]. Генераторы КГТ-220-1000, в сравнении с металлическими и керамическими излучателями, создают сравнительно высокие тепловые потоки и обладают меньшей тепловой инерцией, что упрощает проектирование сушильной техники [10, 16, 17].

Температура плавления желатинизированного студня ограничивает нагрев пенослоя и интенсификацию процесса сушки только до определенного значения влажности высушиваемого продукта. Начиная с этого значения влажности, пеноструктура в процессе сушки образует прочный каркас, не подвергающийся плавлению, а температура нагрева продукта ограничивается исключительно температурой начала разложения содержащихся в нем термолабильных веществ.

Диапазон варьирования скорости потока воздуха $\nu = 4–5$ м/с ограничивается техническими

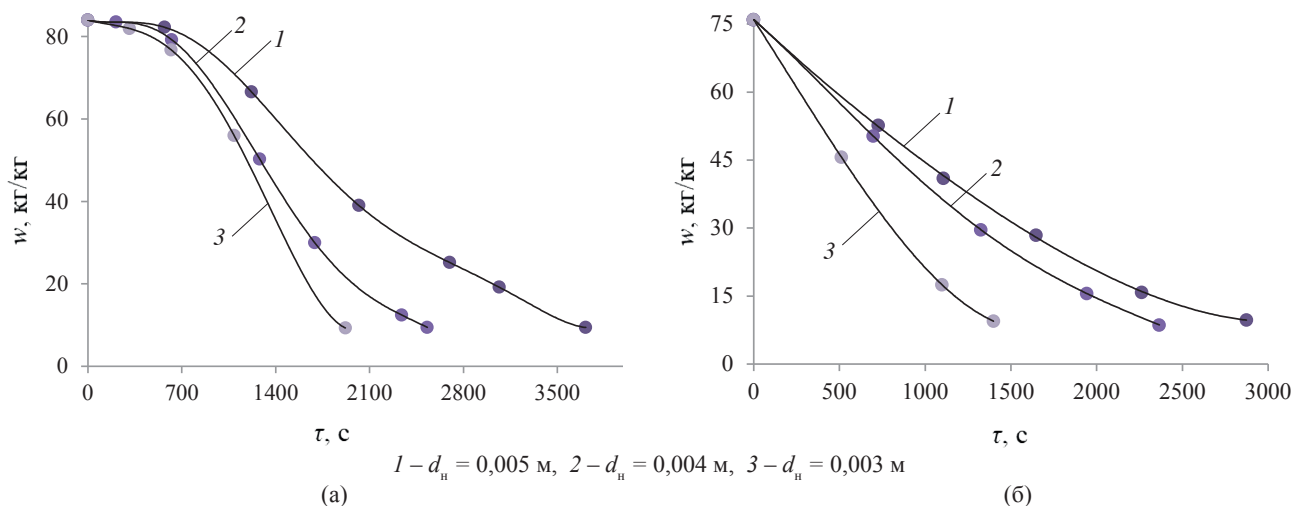


Рисунок 1. Кривые конвективно-радиационной сушки штранг пены желатинового бульона (●) и их аппроксимирующие функции (—) при $C = 0,16 \text{ кг/кг}$ (а) и $C = 0,24 \text{ кг/кг}$ (б)

Figure 1. Convection-radiation drying curves for foam rods of gelatin foam (●) and their approximating functions (—) at $C = 0.16 \text{ kg/kg}$ (a) and $C = 0.24 \text{ kg/kg}$ (b)

возможностями осуществления процесса. Превышение $v = 5 \text{ м/с}$ нецелесообразно из-за механического разрушения (разрыва штранг пены) и уноса продукта. Снижение $v < 4 \text{ м/с}$ способствует увеличению температуры пенослоя в процессе конвективно-радиационной сушки более 333 К . Это приводит к ухудшению его качественных характеристик, локальному плавлению и разрушению.

Пена желатинового бульона с начальной концентрацией сухих веществ $C = 25\text{--}26 \%$ обладает стабильностью при одновременно действующих конвективном ($T = 292\text{--}295 \text{ К}$, $v = 4\text{--}5 \text{ м/с}$, $W = 50\text{--}60 \%$) и объемном (двустороннем) радиационном энергоподводе с плотностью теплового потока, падающего с одной стороны штранга $E = 2,45 \text{ кВт/м}^2$, соответствующей температуре пенослоя $T = 330\text{--}333 \text{ К}$. Это исключает какую-либо деструкцию высушиваемого образца как термолабильного продукта. Вспененные образцы продукта с начальной концентрацией сухих веществ $C = 14\text{--}24 \%$ в силу своих структурно-механических, пеноструктурных и теплофизических характеристик нуждаются в предварительной подсушке в течении $t = 0,03\text{--}0,15 \text{ ч}$ воздухом с температурой, не превышающей температуру желатинизации. Превышение значения $t = 0,15 \text{ ч}$ нецелесообразно, так как по достижении указанного периода времени пенослой образует прочный каркас, не подвергающийся плавлению. Дальнейшее увеличение $t > 0,15 \text{ ч}$ приводит к снижению удельного съема сухого желатина. Снижение $t < 0,03 \text{ ч}$ не обеспечивает стабильность пенослоя, и, после начала подачи инфракрасного энергоподвода, приводит к плавлению стержня пены при его нагреве выше температуры желатинизации.

В результате получены значения текущей влажности продукта w , кг/кг в процессе обезвоживания от времени τ , с . Примеры кривых сушки штранг пены желатинового бульона при исследуемых методах энергоподвода изображены на рисунке 1. Полученные кривые в последующем использованы для построения кривых скорости сушки с целью анализа механизма тепломассопереноса и определения удельной производительности процесса.

По формуле (1) получены значения целевой функции G , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ при различных начальном диаметре штранга пены d_n , мм и начальной влажности вспениваемого бульона $w_n (1-C)$, кг/кг . Относительная ошибка при определении целевой функции не превышала 12% . В результате компьютерной обработки экспериментальных данных получены адекватные аппроксимирующие зависимости съема сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени от варьируемых факторов. Погрешность аппроксимации R^2 полученной зависимости $G = f(w_n, d_n)$ составила не менее $0,997$:

$$G(w_n, d_n) = \left[\begin{aligned} &(a_1 \cdot d_n^2 + b_1 \cdot d_n + c_1) \cdot w_n^2 + \\ &+ (a_2 \cdot d_n^2 + b_2 \cdot d_n + c_2) \cdot w_n + \\ &+ (a_3 \cdot d_n^2 + b_3 \cdot d_n + c_3) \end{aligned} \right] \quad (2)$$

Значения эмпирических коэффициентов $a_p, b_p, c_p, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ целевой функции представлены в таблице 2.

На рисунке 2 в виде полей значений G представлены результаты расчета целевой функции по уравнению (2), полученных для различных методов энергоподвода. Зависимости целевых функций конвективной (рис. 2а) и конвективно-радиационной (рис. 2б) сушки штранг пены

Таблица 2. Значения эмпирических коэффициентов целевой функции

Table 2. Values of the empirical coefficients of the objective function

Конвективная пеносушка					
a_1	0,7	a_2	-0,945	a_3	0,267
b_1	-7,7	b_2	10,995	b_3	-3,547
c_1	22	c_2	-33,82	c_3	12,615
Конвективно-радиационная пеносушка при $E = 0,95$ кВт/м ²					
a_1	10,8	a_2	-16,39	a_3	6,086
b_1	-85,6	b_2	129,85	b_3	-48,176
c_1	164	c_2	-251	c_3	94,422
Конвективно-радиационная пеносушка при $E = 2,45$ кВт/м ²					
a_1	31,3	a_2	-48,045	a_3	18,1765
b_1	-250,5	b_2	384,465	b_3	-145,4185
c_1	460,2	c_2	-709,81	c_3	270,413

желатинового бульона от влияющих факторов d_n и w_n имеют схожий характер. Для рассматриваемых вариантов реализации процесса рост целевой функции наблюдается как при увеличении диаметра штранга, так и при увеличении концентрации сухих веществ в продукте, и ограничивается верхними предельными значениями указанных факторов.

Максимальные значения удельного выхода сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени для исследуемых вариантов реализации процесса сушки, определенные в среде MathCAD с помощью опции Maximize, достигаются при начальной концентрации сухих веществ в продукте $C = 0,24$ кг/кг, начальном диаметре штранга пены $d_n = 4$ мм, а также температуре $T = 292-295$ К, влажности $W = 50-60$ % и скорости сушильного агента $v = 4-5$ м/с и составляют:

– для конвективной сушки штранга пены желатинового бульона $G_{max} = 0,331$ кг/(м²·ч);

– для конвективно-радиационной сушки штранга пены желатинового бульона $G_{max} = 0,998$ кг/(м²·ч) при плотности теплового потока, падающего с одной стороны штранга $E = 2,45$ кВт/м².

На рисунке 3 представлены примеры кривых скоростей конвективно-радиационной сушки штранг пены желатинового бульона от концентрации сухих веществ в продукте в процессе сушки $dw/dt = f(C)$, кг/(кг·с), полученные дифференцированием уравнений кривых сушки. Как известно, внутренний теплообмен, особенно в дисперсных системах, ограничивает скорость удаления влаги из биополимеров, к которым относятся коллагены, в том числе желатин [10, 11].

В результате исследования кинетики конвективно-радиационной сушки штранг вспененного желатинового бульона из отходов переработки рыбы, в том числе анализа кривых скоростей сушки продукта, установлено следующее.

Кривые скорости характеризуются двумя явно выраженными типичными для биополимеров зонами, разграниченными экстремумами функций $dw/dt = f(C)$, кг/(кг·с) [10, 11, 17]. В первой зоне происходит рост скорости сушки до максимальных значений, который соответствует удалению влаги в свободном состоянии с поверхности раздела фаз. Движение влаги их продукта в атмосферу осуществляется в виде пара, образовавшегося внутри пузырьков пены, продвигающегося через каркас пленок и диффундирующего через пленки жидкой фазы. В данном случае, в силу интенсивного испарения влаги исключаются риски перегрева продукта, а в связи с формированием структуры биополимера происходит частичное деформирование

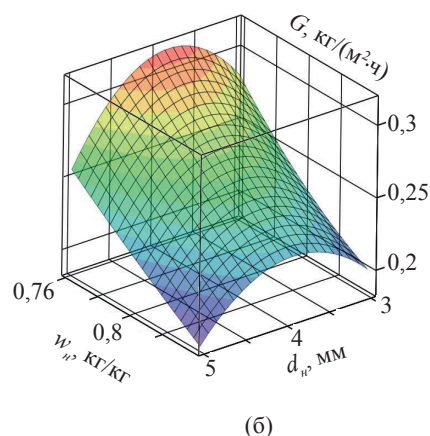
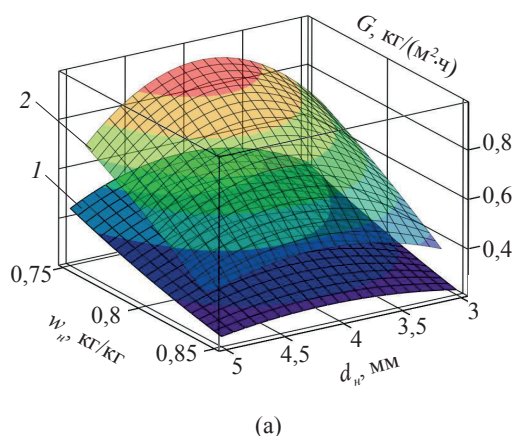


Рисунок 2. Поля значений съема сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени от варьируемых факторов, при различных значениях начального диаметра штранга d_n и начальной влажности w_n вспененного желатинового бульона, при конвективном (а) и конвективно-радиационном (б) методах энергоподвода

Figure 2. Value fields of dry gelatin removal per unit area of the surface per unit of time from variable factors, for different values of the initial diameter of the rod d_i and the initial humidity w_i of the foamed gelatin broth using convective (a) and convective-radiation (b) energy supply methods

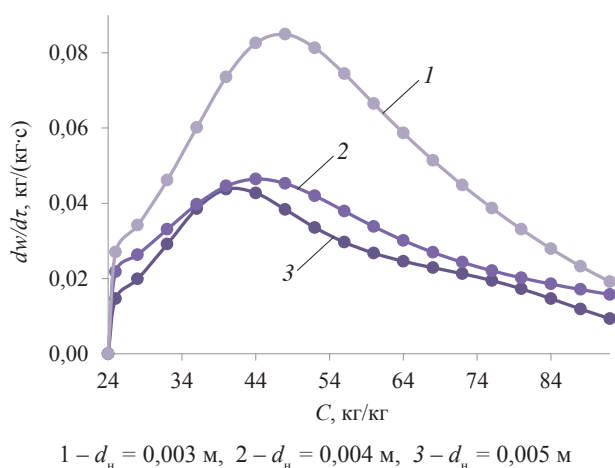


Рисунок 3. Кривые скорости конвективно-радиационной сушки штранг пены желатинового бульона от концентрации сухих веществ в продукте при $w_n = 76\%$ и $E = 2,45$ кВт/м²

Figure 3. Velocity curves of convection-radiation drying rate of gelatin broth foam extrusion vs. concentration of solids in the product at $w_n = 76\%$ and $E = 2.45$ kW/m²

и частичная усадка продукта. Например, для кривой скорости сушки штранга вспененного желатинового бульона с начальным диаметром $d_n = 0,005$ м первая зона соответствует диапазону концентрации сухих веществ в продукте $0,24 < C < 0,405$ кг/кг, вторая зона – диапазону $0,405 < C < 0,9$ кг/кг (рис. 3).

В точке экстремума функции $dw/dt = f(C)$, кг/(кг·с) (рис. 3) происходит высыхание гелеобразных перегородок желатинизированного продукта, влага перемещается в форме пара путем эффузии, а именно при движении отдельных молекул без взаимного контакта. Сам продукт (гель) плавно переходит в биополимерное вещество, обладающее малой пористостью. В результате образуется прочный полимерный каркас и микрокапиллярная сетка.

Во второй зоне (рис. 3), соответствующей удалению влаги полимолекулярной адсорбции, наблюдается спад скорости сушки, углубление поверхности парообразования смещается вглубь штранга. При интенсивном прогревании продукта завершается его полимеризация и формирование его микропористой структуры, завершается усадка пеноштранга [10, 11, 17].

Выводы

Таким образом, проведены исследования кинетики и интенсивности конвективной и конвективно-радиационной сушки желатинового бульона из отходов переработки рыб во вспененном и желатинизированном состоянии. Для последующего использования в расчетах производительности сушильных установок получены аппроксимирующие зависимости целевой функции (выхода сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности

в единицу времени) G , кг/(м²·ч) от варьируемых факторов.

Определены рациональные режимы проведения процесса, при которых достигается максимальный удельный съем сухого продукта: начальная концентрация сухих веществ в продукте $C = 0,24$ кг/кг; температура $T = 292–295$ К, влажность $W = 50–60$ % и скорость сушильного агента $v = 4–5$ м/с; начальный диаметр штранга пены $d_n = 4$ мм; плотность теплового потока, падающего с одной стороны штранга $E = 2,45$ кВт/м²; длина волны излучателей $\lambda = 1,01–1,11$ мкм, соответствующая максимальной интенсивности излучения, определяющей напряженность на излучателях $U = 220$ В.

В результате исследований интенсивности конвективно-радиационной сушки желатинового бульона установлено, что введение радиационного энергоподвода в процесс конвективной пеносушки желатинизированного бульона при рациональных режимах практически в три раза увеличивает удельную производительность процесса.

В результате исследования кинетики конвективной и конвективно-радиационной сушки получены функциональные зависимости скорости сушки штранг вспененного желатинового бульона от концентрации сухих веществ в продукте (C , кг/кг) для рассмотренных режимов реализации процесса. С использованием кривых скорости выполнен анализ тепломассопереноса при конвективно-радиационной пеносушке желатинизированного бульона. В результате установлено, что характер изменения скорости сушки продукта типичен для большинства биополимеров, кривые скорости характеризуются двумя явно выраженными зонами влагоудаления, разграниченными экстремумами функций.

По результатам исследований подана заявка № 2018116255 на получение патента на изобретение «Способ сушки желатинового бульона при производстве сухого желатина».

Критерии авторства

А. В. Макаров наработал образцы желатина из отходов переработки рыбы, провел сравнительное исследование процесса сушки желатинового бульона при различных методах энергоподвода, выполнил обработку, анализ данных и определил рациональные режимы процесса конвективной-радиационной пеносушки желатинового бульона. Ю. А. Максименко руководил проведением исследований. Э. П. Дяченко предложил метод конвективно-радиационной пеносушки желатинового бульона, принимал участие в сравнительном исследовании процессов сушки желатинового бульона при различных методах энергоподвода, обработке данных, определении рациональных режимов процесса и анализе результатов исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

A.V. Makarov obtained gelatin samples from fish processing wastes, determined the rational modes of the convective-radiation foam drying, and performed the comparative study of the process of drying with various energy supply methods, as well as processing and data analysis. Yu.A. Maksimenko was the leading scientist.

E.P. Dyachenko proposed the method of convective-radiation foam drying of gelatin broth and took part in the comparative study of the processes of drying gelatin broth with various methods of energy supply, data processing, determination of rational process conditions, and analysis of research results.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Gelatin handbook. Gelatin manufacturers institute of America. GMIA, 2019. – 26 p.
2. Gelatin Drying Technology (Gelatin Dryer) [Internet]. – Available from: <https://gelatin.nl/home>. – Date of the application: 12.08.2019.
3. Технология производства желатина [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gelatin.by/partners/technology>. – Дата обращения: 12.08.2019.
4. Characteristics and gelling properties of gelatin from goat skin as affected by drying methods / S. Mad-Ali, S. Benjakul, T. Prodpran [et al.] // Journal of Food Science and Technology. – 2017. – Vol. 54, № 6. – P. 1646–1654. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2597-5>.
5. Kusumaningrum, I. Extraction optimization and characterization of gelatine from fish dry skin of Spanish mackerel (*Scomberomorus commersoni*) / I. Kusumaningrum, Y. Pranoto, S. Hadiwiyoto // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 144, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/144/1/012036>.
6. Hue, C. T. Physicochemical characterization of gelatin extracted from European perch (*Perca fluviatilis*) and Volga pikeperch (*Sander volgensis*) skins / C. T. Hue, N. T. M. Hang, R. G. Razumovskaya // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. – 2017. – Vol. 17, № 6. – P. 1117–1125. DOI: https://doi.org/10.4194/1303-2712-v17_6_05.
7. Асякина, Л. К. Возможность использования желатина как компонента для получения биоразлагаемых полимеров / Л. К. Асякина, Л. С. Дышлюк // Актуальные вопросы индустрии напитков. – 2017. – № 1. – С. 19–21.
8. Native and modified gelatin films produced by casting, extrusion, and blowing extrusion processes / C. Andreuccetti, T. Galicia-García, R. González-Núñez [et al.] // Polymers from Renewable Resources. – 2017. – Vol. 8, № 1. – P. 11–26. DOI: <https://doi.org/10.1177/204124791700800102>.
9. Пахомова, Ю. В. Некоторые особенности кинетики инфракрасной сушки лигносульфоната во вспененном состоянии / Ю. В. Пахомова // Наука без границ. – 2018. – Т. 27, № 10. – С. 65–68.
10. Алексанян, И. Ю. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование: монография / И. Ю. Алексанян, А. А. Буйнов. – Астрахань : Астраханский государственный технический университет, 2004. – 380 с.
11. Алексанян, И. Ю. Анализ кинетики обезвоживания сульфанола / И. Ю. Алексанян, Э. П. Дяченко, В. В. Ермолаев // Химическая промышленность. – 2009. – № 3. – С. 150.
12. Olaniyan, A. M. Effect of foaming agent, foam stabilizer and whipping time on drying process of tomato paste under different drying equipment / A. M. Olaniyan, J. A. Adeoti, M. O. Sunmonu // International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing. – 2017. – Vol. 8, № 2. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1793962317400049>.
13. Тормозов, И. В. Использование пен в пищевой промышленности / И. В. Тормозов // Образование и наука без границ: фундаментальные и прикладные исследования. – 2017. – № 6. – С. 356–358.
14. Дяченко, М. М. Технология кормовой муки из мясокостных тканей тлюеней / М. М. Дяченко, Н. П. Боева, Э. П. Дяченко // Труды ВНИРО. – 2017. – Т. 166. – С. 159–178.
15. Трубилин, Е. И. Энергоемкость сушки растительного сырья: проблемы и пути решения / Е. И. Трубилин, Е. И. Виневский // Технический оппонент. – 2019. – № 1. – С. 48–53.
16. Фоменко, Е. В. Совершенствование процессов получения гранулированной клейковины пшеничной: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Фоменко Екатерина Валерьевна. – Краснодар, 2019. – 20 с.
17. Никулина, М. А. Совершенствование процесса инфракрасной сушки пищевой съедобной пленки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Никулина Мария Александровна. – Санкт-Петербург, 2018. – 16 с.
18. Нугманов, А. Х.-Х. Изучение кинетики и анализ закономерности процесса формирования штранга из рыбной фаршевой смеси / А. Х.-Х. Нугманов, А. И. Алексанян // Индустрия питания. – 2018. – Т. 3, № 3. – С. 46–51.
19. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования экспериментов / Ю. П. Грачев, Ю. М. Плаксин. – М. : ДеЛи принт, 2005. – 296 с.

20. Kao Тхи Хуе. Обоснование и разработка технологии получения структурообразователя из кожи рыб: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04 / Kao Тхи Хуе. – М., 2012. – 25 с.

21. Ильясов, С. Г. Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов / С. Г. Ильясов, В. В. Красников. – М. : Пищевая промышленность, 1978. – 359 с.

References

1. Gelatin handbook. Gelatin manufacturers institute of America. GMIA; 2019. 26 p.
2. Gelatin Drying Technology (Gelatin Dryer) [Internet]. [cited 2019 Aug 12]. Available from: <http://gelatin.nl/home>.
3. Tekhnologiya proizvodstva zhelatina [Gelatin production technology] [Internet]. [cited 2019 Aug 12]. Available from: <https://gelatin.by/partners/technology>.
4. Mad-Ali S, Benjakul S, Prodpran T, Maqsood S. Characteristics and gelling properties of gelatin from goat skin as affected by drying methods. *Journal of Food Science and Technology*. 2017;54(6):1646–1654. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2597-5>.
5. Kusumaningrum I, Pranoto Y, Hadiwiyoto S. Extraction optimization and characterization of gelatine from fish dry skin of Spanish mackerel (*Scomberomorus commersoni*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;144(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/144/1/012036>.
6. Hue CT, Hang NTM, Razumovskaya RG. Physicochemical characterization of gelatin extracted from European perch (*Perca fluviatilis*) and Volga pikeperch (*Sander volgensis*) skins. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2017;17(6):1117–1125. DOI: https://doi.org/10.4194/1303-2712-v17_6_05.
7. Asyakina LK, Dyshlyuk LS. Vozmozhnost' ispol'zovaniya zhelatina kak komponenta dlya polucheniya biorazlagaemykh polimerov [Options for using gelatin as a component to obtain biodegradable polymers]. *Aktual'nye voprosy industrii napitkov* [Actual Issues of Beverage Industry]. 2017;(1):19–21. (In Russ.).
8. Andreuccetti C, Galicia-García T, González-Nuñez R, Martínez-Bustos F, Grosso CRF. Native and modified gelatin films produced by casting, extrusion, and blowing extrusion processes. *Polymers from Renewable Resources*. 2017;8(1):11–26. DOI: <https://doi.org/10.1177/204124791700800102>.
9. Pahomova YuV. Some features of the kinetics of infrared drying of lignosulfonate in the foamed state. *Nauka bez granits* [Science without Borders]. 2018;27(10):65–68. (In Russ.).
10. Aleksanyan IYu, Buynov AA. Vysokointensivnaya sushka pishchevykh produktov. Penosushka. Teoriya. Praktika. Modelirovanie: monografiya [High intensity food drying. Foam dryer. Theory. Practice. Modeling: monography]. Astrakhan: Astrakhan State Technical University; 2004. 380 p. (In Russ.).
11. Aleksanyan IYu, Dyachenko EhP, Ermolaev VV. Analiz kinetiki obezvozhivaniya sul'fonola [Analysis of the kinetics of sulphonol dehydration]. *Industry & Chemistry*. 2009;(3):150. (In Russ.).
12. Olaniyan AM, Adeoti JA, Sunmonu MO. Effect of foaming agent, foam stabilizer and whipping time on drying process of tomato paste under different drying equipment. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*. 2017;8(2). DOI: <https://doi.org/10.1142/S1793962317400049>.
13. Tormozov IV. Use of foams in food industry. *Obrazovanie i nauka bez granits: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya* [Education and science without borders: fundamental and applied research]. 2017;(6):356–358. (In Russ.).
14. Dyachenko MM, Boeva NP, Dyachenko EP. Technology of flour fodder from meat and osteal tissues of seals. *VNIRO Proceedings*. 2017;166:159–178. (In Russ.).
15. Trubilin EI, Vinevskii EI. Energy intensity of drying of plant raw material: problems and solutions. *Technical opponent*. 2019;(1):48–53. (In Russ.).
16. Fomenko EV. Sovershenstvovanie protsessov polucheniya granulirovannoy kleykoviny pshenichnoy [Improving the processes for producing granulated wheat gluten]. *Cand. eng. sci. diss.* Krasnodar, 2019. 20 p.
17. Nikulina MA. Sovershenstvovanie protsessa infrakrasnoy sushki pishchevoy s'edobnoy plenki [Improving the process of infrared drying of edible food wrap]. *Cand. eng. sci. diss.* St. Petersburg: ITMO University; 2018. 16 p.
18. Nugmanov AH-H, Aleksanyan AI. Kinetics study and consistent pattern analysis of the rod production process from the fish mince. *Food Industry*. 2018;3(3):46–51. (In Russ.).
19. Grachev YuP, Plaksin YuM. Matematicheskie metody planirovaniya ehksperimentov [Mathematical methods of experiment planning]. Moscow: DeLi print; 2005. 296 p. (In Russ.).
20. Kao TK. Obosnovanie i razrabotka tekhnologii polucheniya strukturoobrazovatelya iz kozhi ryb [Substantiation and development of the technology for producing structural agent from fish skin]. *Cand. eng. sci. diss.* Moscow: Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography; 2012. 25 p.
21. Il'yasov SG, Krasnikov VV. Fizicheskie osnovy infrakrasnogo oblucheniya pishchevykh produktov [Physical fundamentals of infrared food irradiation]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost'; 1978. 359 p. (In Russ.).


Сведения об авторах

Макаров Александр Викторович

старший преподаватель кафедры технологии товаров и товароведения, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, тел.: +7 (8512) 61-45-94, e-mail: amxs1@yandex.ru

Максименко Юрий Александрович

д-р. техн. наук, заведующий кафедрой технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, тел.: +7 (8512) 61-44-69, e-mail: amxs1@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7973-1903>

Дяченко Эдуард Павлович

канд. техн. наук, научный сотрудник отдела технологий и инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства», 140153, Россия, Московская область, Раменский район, д. Верея, тел.: +7 (8-496) 46-24-364, e-mail: amxs1@yandex.ru


Information about the authors

Aleksandr V. Makarov

Senior Lecturer of the Department of Technology of Goods and Commodity Science, Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russia, phone: +7 (8512) 61-45-94, e-mail: amxs1@yandex.ru

Yuriy A. Maksimenko

Dr.Sci.(Eng.), Head of the Department of Technological Machines and Machinery, Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russia, phone: +7 (8512) 61-44-69, e-mail: amxs1@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7973-1903>

Eduard P. Dyachenko

Cand.Sci.(Eng.), Researcher of the Department of Technology and Innovation, All-Russia Horticulture Research Institute – a branch of Federal horticulture Science Center, Vereya village, Ramensky district, Moscow region, 140153, Russia, phone: +7 (8-496) 46-24-364, e-mail: amxs1@yandex.ru