



## Оптические и терморadiационные характеристики пенослоя томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина

Вячеслав П. Дяченко	<sup>1</sup>	<a href="mailto:dyachenko.1999g@mail.ru">dyachenko.1999g@mail.ru</a>	
Алексян И. Юрьевич	<sup>1</sup>	<a href="mailto:16081960igor@gmail.com">16081960igor@gmail.com</a>	 0000-0001-5494-1226
Эдуард П. Дяченко	<sup>2</sup>	<a href="mailto:amed-nauka@ya.ru">amed-nauka@ya.ru</a>	 0000-0001-5518-911X
Борис В. Набатов	<sup>3</sup>	<a href="mailto:bnabatov@crys.ras.ru">bnabatov@crys.ras.ru</a>	

<sup>1</sup> Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия



<sup>2</sup> Институт медицинских материалов, ул. Спартаковская, 24, г. Москва, 105066, Россия

<sup>3</sup> Отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Ленинский пр-т, 59, г. Москва, 119333, Россия

**Аннотация.** Томатная паста является важнейшим концентрированным продуктом переработки томатов, широко востребованным в пищевой промышленности в качестве полуфабриката для производства соусов, кетчупов, консервов и широкого спектра других продуктов питания. Перспективным направлением совершенствования технологии сушки томатной пасты является пеносушка с применением инфракрасного (радиационного) энергоподвода, позволяющая интенсифицировать процесс влагоудаления и сохранить качество готового продукта. В качестве пенообразователя и стабилизатора пены предложено использование раствора ихтиожелатина – биополимера, получаемого из отходов рыбопереработки. Рациональная реализация процесса конвективно-радиационной пеносушки требует комплексного изучения оптических и терморadiационных свойств обезвоживаемого материала. В настоящей работе представлены результаты исследования оптических и терморadiационных характеристик пенослоя томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина в качестве пенообразователя и стабилизатора. Рассмотрены особенности поглощения тепловой энергии инфракрасного излучения оптически тонким слоем продукта (толщиной  $h \leq 0,004$  м) в диапазоне влажности  $0,10 \leq w \leq 0,78$  кг/кг, при его облучении различными генераторами излучения: кварцевой галогенной трубкой, нихромовой спиралью, металлической плиткой, плиткой газового инфракрасного излучения и трубчатым электронагревателем. Исследования выполнены экспериментально-аналитически с применением спектрофотометра UV-Vis-NIR Cary 5000 (Varian) с приставкой интегрирующей сферы DRA-2500 в спектральном диапазоне  $800 \leq \lambda \leq 2\,500$  нм. Получены зависимости  $W = f(x, w)$ , Вт/м<sup>3</sup> распределения объёмной плотности поглощённой энергии излучения по глубине оптически тонкого пенослоя при объёмном (двустороннем) подводе к продукту теплового потока с суммарной плотностью  $E = 1680$  Вт/м<sup>2</sup>. По результатам анализа полученных зависимостей, а также сопоставления эмиссионных характеристик генераторов излучения и спектральной пропускательной способности пенослоя подтверждена целесообразность применения кварцевых галогенных трубок при напряжении 220 В для обеспечения наиболее равномерного распределения поглощённой энергии по глубине слоя в течение всего процесса влагоудаления. Полученные зависимости применимы для последующего моделирования нестационарных температурных полей в продукте в течение процесса пеносушки томатной пасты при конвективно-радиационном энергоподводе

**Ключевые слова:** томатная паста, ихтиожелатин, пенослой, пеносушка, инфракрасное излучение, оптические характеристики, терморadiационные характеристики, распределение поглощённой энергии.

## Optical and thermoradiation characteristics of tomato paste foam layer with the addition of ichthyogelatin solution

Vyacheslav P. Diachenko	<sup>1</sup>	<a href="mailto:dyachenko.1999g@mail.ru">dyachenko.1999g@mail.ru</a>	
Igor Yu. Aleksanyan	<sup>1</sup>	<a href="mailto:16081960igor@gmail.com">16081960igor@gmail.com</a>	 0000-0001-5494-1226
Eduard P. Diachenko	<sup>2</sup>	<a href="mailto:amed-nauka@ya.ru">amed-nauka@ya.ru</a>	 0000-0001-5518-911X
Boris V. Nabatov	<sup>3</sup>	<a href="mailto:bnabatov@crys.ras.ru">bnabatov@crys.ras.ru</a>	

<sup>1</sup> Astrakhan State Technical University, Tatishchev Street, Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia

<sup>2</sup> Institute of Medical Materials, Spartakovskaya Street, Bldg. 24, Moscow, 105066, Russia

<sup>3</sup> Department of the A.V. Shubnikov Institute of Crystallography of the Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics National Research Centre «Kurchatov Institute», Leninsky Prospekt, Bldg. 59, Moscow, 119333, Russia

Для цитирования  
Дяченко В.П., Алексян И.Ю., Дяченко Э.П., Набатов Б.В. Оптические и терморadiационные характеристики пенослоя томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 267–274. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-267-274

For citation  
Diachenko V.P., Aleksanyan I. Yu., Diachenko E.P., Nabatov B.V. Optical and thermoradiation characteristics of tomato paste foam layer with the addition of ichthyogelatin solution. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 267–274. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-267-274

**Abstract.** Tomato paste is a highly concentrated tomato processing product, widely used in the food industry as a semi-finished product for the production of sauces, ketchups, canned goods, and a wide range of other food products. A promising area for improving tomato paste drying technology is foam drying using infrared (radiation) energy supply, which allows for intensifying the moisture removal process and preserving the quality of the finished product. A solution of ichthyogelatin, a biopolymer obtained from fish processing waste, has been proposed as a foaming agent and foam stabilizer. Rational implementation of convective-radiation foam drying requires a comprehensive study of the optical and thermoradiation properties of the dehydrated material. This paper presents the results of a study of the optical and thermoradiation characteristics of a foam layer of tomato paste with the addition of a solution of ichthyogelatin as a foaming agent and stabilizer. The absorption of infrared thermal energy by an optically thin product layer ( $h \leq 0.004$  m thick) in the humidity range of  $0.10 \leq w \leq 0.78$  kg/kg was examined when irradiated with various radiation generators: a quartz halogen tube, a nichrome coil, a metal plate, a gas infrared radiation plate, and a tubular electric heater. The experimental and analytical studies were performed using a Varian Cary 5000 UV-Vis-NIR spectrophotometer with a DRA-2500 integrating sphere attachment in the spectral range of  $800 \leq \lambda \leq 2500$  nm. The dependences  $W=f(x,w)$ ,  $W/m^3$  of the distribution of the volumetric density of absorbed radiant energy by the depth of an optically thin foam layer with a volumetric (two-sided) supply of heat flow to the product with a total density of  $E=1680$   $W/m^2$  were obtained. Based on the analysis of the obtained dependences, as well as a comparison of the emission characteristics of the radiation generators and the spectral transmittance of the foam layer, the feasibility of using quartz halogen tubes at 220V was confirmed to ensure the most uniform distribution of absorbed energy across the layer depth throughout the moisture removal process. The obtained dependences are applicable for subsequent modeling of transient temperature fields in the product during the foam drying process of tomato paste with convective-radiative energy supply

**Keywords:** tomato paste, ichthyogelatin, foam layer, foam-mat drying, infrared radiation, optical characteristics, thermoradiative characteristics, absorbed energy distribution.

## Введение

Томатная паста занимает одно из ключевых мест среди концентрированных продуктов переработки томатов, широко применяется в качестве полуфабриката при производстве соусов, кетчупов, супов, консервированных и кулинарных изделий [1–3]. Производство сухой томатной пасты открывает возможности для снижения транспортных затрат, увеличения срока хранения, расширения ассортимента пищевых продуктов с применением данного ингредиента. Мировой объём производства томатного порошка методом распылительной сушки неуклонно растёт [4, 5], однако данный метод сопряжён со значительными энергозатратами [6] и термическим повреждением каротиноидов [7] и аскорбиновой кислоты [8].

Перспективным методом обезвоживания пастообразных и вязких пищевых продуктов является пеносушка – технология, основанная на предварительном диспергировании продукта с последующим обезвоживанием пенослоя. Развитая удельная поверхность тепломассообмена пенослоя обеспечивает ускорение влагоудаления и снижение температуры сушки, что способствует сохранению термолабильных биологически активных веществ (каротиноидов, ликопина, аскорбиновой кислоты [4]). Томатная паста не обладает выраженной пенообразующей способностью, в ряде исследований в качестве пенообразователей и стабилизаторов применялись различные ингредиенты: яичный альбумин, карбоксиметилцеллюлоза, соевый белок и др. [4, 9, 10]. При этом применение ихтиожелатина (биополимера с минимальной аллергенностью,

получаемого из отходов рыбопереработки) в данном качестве не описано, что определяет научную новизну настоящей работы.

Применение ИК-излучения в качестве источника энергоподвода при пеносушке обеспечивает интенсификацию теплообмена, снижение температурных градиентов и улучшенное сохранение качества по сравнению с конвективной сушкой [10–12]. Перспективность радиационного энергоподвода при обезвоживании томатных продуктов подтверждена экспериментально [13, 14]. Так, ИК-сушка томатов до конечной влажности 10–12% в осциллирующем режиме позволяет сохранить витамин С и минеральный состав продукта при сокращении времени процесса [14].

Рациональная реализация процесса конвективно-радиационной пеносушки вспененной томатной пасты требует комплексного исследования оптических и терморadiационных характеристик обезвоживаемого материала, прежде всего – понимания характера зависимостей распределения объёмной плотности поглощённой энергии излучения  $W$ ,  $Вт/м^3$ , по глубине пенослоя для различных генераторов ИК-излучения [10]. Для вспененной томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина в качестве пенообразователя и стабилизатора такие данные в открытых источниках отсутствуют.

**Цель работы** – исследование оптических и терморadiационных характеристик пенослоя томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина в качестве пенообразователя и стабилизатора, как исходных данных для совершенствования процесса пеносушки продукта при конвективно-радиационном энергоподводе.

**Объекты и методы**

Объектом исследования является аэрированная (вспененная) томатная паста с добавлением раствора ихтиожелатина в форме пластин (пенослоя) толщиной  $h = 0,002$  м и  $h = 0,004$  м во влажном (гелеобразном) и обезвоженном (сухом) состоянии. Использовали томатную пасту по ГОСТ 3343–2017 с содержанием сухих веществ 28%. Раствор ихтиожелатина получали по методике, приведённой в работе [15]. Образцы для исследований готовили путём взбивания томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина до получения устойчивой пенной структуры с максимальной кратностью пены и последующего формования пластин заданной толщины. Для получения сухих образцов, пластины сушили при конвективно-радиационном энергоподводе. Диапазон влажности объекта исследования  $0,10 \leq w \leq 0,78$  кг/кг определён с учётом литературных данных (для нижней границы) [10, 14], верхняя граница определена эмпирически.

Экспериментальные данные о направленно-полусферических спектральных характеристиках образцов (спектрах отражения  $R_{\lambda}$ , % и пропускания  $T_{\lambda}$ , %) получены на спектрофотометре UV-Vis-NIR Cary 5000 (Varian, США) с приставкой интегрирующей сферы DRA-2500 в спектральном диапазоне  $800 \leq \lambda \leq 2500$  нм. Гелеобразные образцы предварительно помещались в кварцевую кювету. Выбор спектрального диапазона обусловлен техническими характеристиками спектрофотометра и согласуется с диапазонами аналогичных исследований других пищевых и биополимерных материалов [10]. В таблице 1 представлены основные параметры исследований.

Зависимости  $W = f(x, w)$  рассчитывались методом усреднённых оптических и терморрадиационных характеристик [10]. Исходными данными для расчёта служили направленно-полусферические терморрадиационные характеристики продукта, а также спектральные характеристики генераторов излучения, приведённые в литературных источниках [10]. В расчётах рассмотрены пять генераторов излучения: кварцевая галогенная трубка КГТ-220–1000 (КГТ), нихромовая спираль в кварцевой трубке (НС), металлическая плитка (МП), плитка газового инфракрасного излучения (ПГИИ), трубчатый электронагреватель (ТЭН).

Таблица 1.

Основные параметры исследований оптических и терморрадиационных характеристик пенослоя томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина

Table 1.

The main parameters of the study of optical and thermoradiation characteristics of a foam layer of tomato paste with the addition of an ichthyogelatin solution

Параметр   Index	Значение Value
Влажность продукта $w$ , кг/кг Product moisture content $w$ , kg/kg	$0,10 \leq w \leq 0,78$
Спектральный диапазон $\lambda$ , нм Spectral range $\lambda$ , nm	$800 \leq \lambda \leq 2500$
Глубина оптически тонкого слоя $x$ , м Optically thin layer depth $x$ , m	$0,000 \leq x \leq 0,004$
Плотность теплового потока с одной стороны пенослоя $E_p$ , Вт/м <sup>2</sup> (общая $E$ , Вт/м <sup>2</sup> ) Heat flux density on one side of the foam layer $E_p$ , W/m <sup>2</sup> (total $E$ , W/m <sup>2</sup> )	840 (1680)

**Результаты и обсуждение**

На рисунке 1 представлены спектры направленно-полусферического отражения  $R_{\lambda}$ , % и пропускания  $T_{\lambda}$ , % пенослоя вспененной томатной пасты с ихтиожелатином при двух значениях толщины ( $h = 0,004$  м и  $h = 0,002$  м) и двух крайних значениях влажности ( $w = 0,10$  кг/кг и  $w = 0,78$  кг/кг). Наблюдаемая закономерность (уменьшение пропускательной способности и рост отражательной способности при увеличении толщины слоя) характерна для оптически тонких слоёв пищевых и биополимерных материалов и соответствует результатам аналогичных исследований других капиллярно-пористых коллоидных тел [10].

Анализ спектральных кривых (рисунок 1) показывает, что при увеличении влажности продукта от  $w = 0,10$  до  $w = 0,78$  кг/кг наблюдается существенный рост пропускательной способности пенослоя (в диапазоне  $\lambda \approx 800–1400$  нм), что обусловлено увеличением доли воды, поглощающей ИК-излучение в коротковолновой части ближнего ИК-диапазона. При  $\lambda$  более 1500 нм пропускательная способность снижается практически до нуля при любой влажности вследствие интенсивного поглощения излучения водой и органическими компонентами томатной пасты [4]. Данное поведение аналогично установленному для желатинового пенослоя [16], однако характеристики исследуемого продукта отличаются по абсолютным значениям вследствие присутствия каротиноидов и других компонентов томатной пасты.

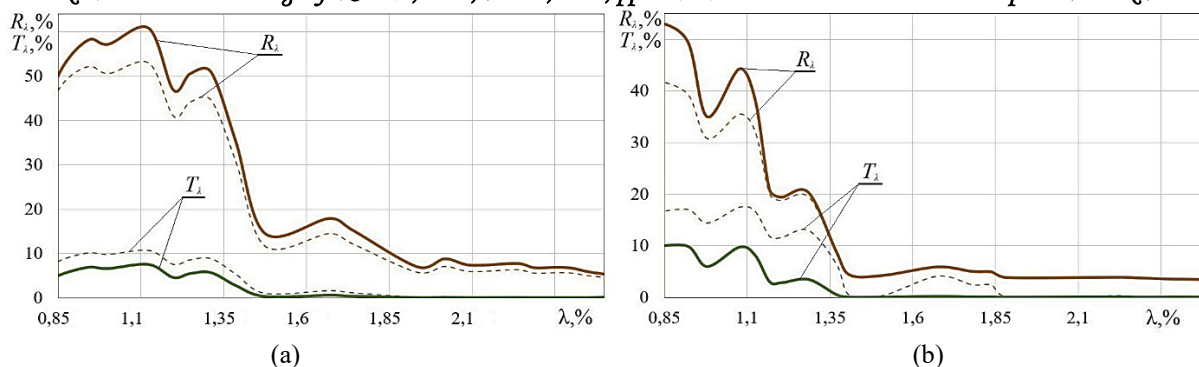


Рисунок 1. Кривые направленно-полусферических терморрадиационных характеристик пенослоя томатной пасты с добавлением раствора икhtiожелатина толщиной  $h = 0,004$  м (—) и  $h = 0,002$  м (---) при  $w = 0,10$  кг/кг (а) и  $w = 0,78$  кг/кг (б)

Figure 1. Curves of directional hemispherical thermoradiation characteristics of a foam layer of tomato paste with the addition of a solution of ichthyogelatin with a thickness of  $h = 0.004$  m (—) and  $h = 0.002$  m (---) at  $w = 0.10$  kg/kg (a) and  $w = 0.78$  kg/kg (b)

Сопоставление спектральных характеристик пропускательной способности пенослоя с относительной интенсивностью излучения различных генераторов (рис. 2) позволяет сделать следующие выводы.

Максимум относительной интенсивности излучения КГТ ( $\lambda \approx 800 - 1200$  нм при 220 В) совпадает с областью наибольшей прозрачности пенослоя в диапазоне влажности  $0,10 \leq w \leq 0,78$  кг/кг. Данный эффект означает, что излучение КГТ проникает вглубь слоя

наиболее равномерно, что обеспечивает объёмный характер нагрева и снижает риск перегрева поверхностных слоёв продукта.

Для длинноволновых генераторов (МП, ПГИИ, ТЭН) максимумы интенсивности приходятся на область  $\lambda > 2000$  нм, где пропускательная способность пенослоя близка к нулю: излучение поглощается преимущественно в поверхностном слое, что ведёт к неравномерному нагреву материала по толщине [10].

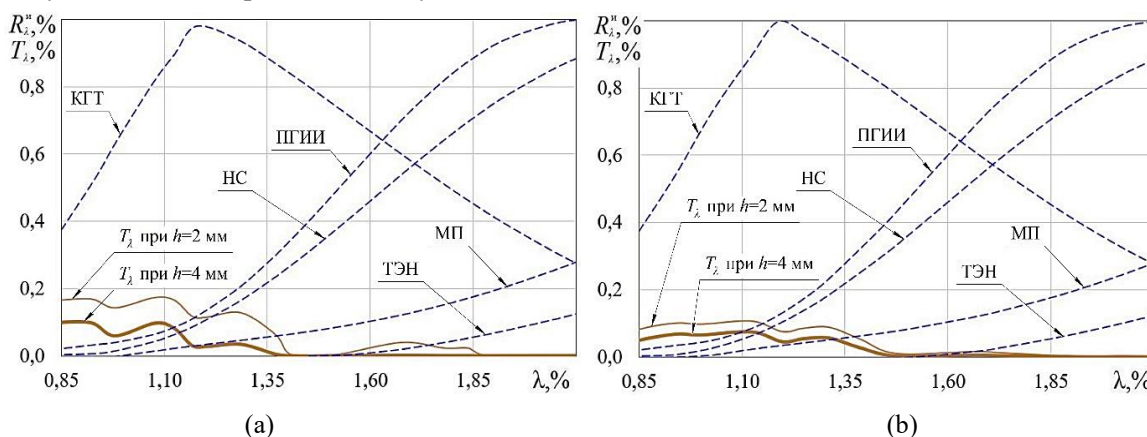


Рисунок 2. Относительная интенсивность излучения  $R_i^H, \%$  различных генераторов (---) в сопоставлении со спектром пропускания  $T_i, \%$  пенослоя (—) при  $w = 0,78$  кг/кг (а) и  $w = 0,10$  кг/кг (б)

Figure 2. Relative radiation intensity  $R_i^H, \%$  of different generators (---) in comparison with the transmission spectrum  $T_i, \%$  of the foam layer (—) at  $w = 0.78$  kg/kg (a) and  $w = 0.10$  kg/kg (b)

Данный вывод согласуется с результатами исследований, описанных в работе [16] в отношении икhtiожелатинового пенослоя и подтверждает общую закономерность, описанную в монографии [10]: для пеносушки пищевых продуктов с высокой начальной влажностью наиболее рациональным является применение коротковолновых генераторов типа КГТ, обеспечивающих равномерный объёмный прогрев.

По результатам обработки экспериментальных спектрофотометрических данных методом усреднённых характеристик получены

аппроксимирующие зависимости оптических характеристик пенослоя – отражательной способности оптически полубесконечного слоя  $R_\infty(w)$  и коэффициента эффективного ослабления потока излучения  $L(w), \text{м}^{-1}$ :

$$R_\infty(w) = a \cdot w + b,$$

$$L(w) = a_1 \cdot w^5 + b_1 \cdot w^4 + a_2 \cdot w^3 + b_2 \cdot w^2 + a_3 \cdot w + b_3,$$

где  $a, b, a_1-a_5, b_1-b_5$  – коэффициенты, значения которых для выбранных пяти генераторов излучения представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Значения коэффициентов уравнений оптических характеристик  $R_\infty$  и  $L$ ,  $m^{-1}$ , пеносля томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина для различных генераторов излучения

Table 2.

Values of the coefficients of the equations of the optical characteristics  $R_\infty$  and  $L$ ,  $m^{-1}$ , of the foam layer of tomato paste with ichthyogelatin for different radiation generators

Коэффициент Coef	КГТ	НС	МП	ПГИИ	ТЭН
$R_\infty$					
$a$	-0,2550	-0,0784	-0,0655	-0,0877	-0,0410
$b$	0,3891	0,1127	0,0997	0,1261	0,0687
$L, m^{-1}$					
$a_1$	0,5656	-12,8328	-14,2098	-15,1396	7,6301
$b_1$	-0,6905	-31,7731	-33,0546	-31,0427	-10,2851
$a_2$	-4,5249	102,6628	113,6784	121,1172	-61,0412
$b_2$	5,5238	254,1844	264,4372	248,3417	82,2809
$a_3$	4,8239	-240,1609	-255,6498	-279,0178	132,3321
$b_3$	88,9643	-497,0824	-531,6531	-474,3818	-161,1592

Для расчёта распределения объёмной плотности поглотённой энергии излучения по глубине оптически тонкого пеносля при двустороннем подводе теплового потока

плотностью  $E_n = 840 \text{ Вт/м}^2$  использована модель, предложенная в работе [10] и изображенная на рисунке 3.

$$W(x, w) = 840 \cdot L(x, w) \frac{1 - R_\infty(w)}{1 - \psi^2(w, x)} \left[ \frac{\exp(-L(w, x) \cdot x) - \frac{\psi^2(w, x)}{R_\infty(w)} \exp(L(w, x) \cdot x)}{1 - \psi^2(w, x)} \right] +$$

$$+ 840 \cdot L((0,004 - x), w) \cdot \frac{1 - R_\infty(w)}{1 - \psi^2(w, (0,004 - x))} \left[ \frac{\exp(-L(w, 0,004 - x) \cdot (0,004 - x)) - \frac{\psi^2(w, (0,004 - x))}{R_\infty(w)} \exp(L(w, (0,004 - x)) \cdot (0,004 - x))}{1 - \psi^2(w, (0,004 - x))} \right]$$

Рисунок 3. Модель для расчета функции  $W = f(x, w)$ ,  $\text{Вт/м}^2$  распределения объёмной плотности поглотённой энергии излучения по глубине оптически тонкого пеносля при двустороннем подводе теплового потока плотностью  $E_n = 840 \text{ Вт/м}^2$

Figure 3. Model for calculating the function  $W = f(x, w)$ ,  $\text{W/m}^2$  of the distribution of the volumetric density of absorbed radiant energy by the depth of an optically thin foam layer with a two-sided supply of heat flux with a density of  $E_n = 840 \text{ W/m}^2$

В составе указанной модели  $\psi(w, x) = R_\infty(w) \exp(-L(w, x) \cdot x)$ ,  $R_\infty(w)$  – это отражательная способность оптически полубесконечного слоя,  $L(w, x)$ ,  $m^{-1}$  является коэффициентом эффективного ослабления потока излучения по мере его распространения в слое.

На рисунке 4 представлена трёхмерная графическая интерпретация зависимости  $W = f(x, w)$  для излучателя КГТ в диапазоне влажности  $0,10 \leq w \leq 0,78 \text{ кг/кг}$  и глубины  $0,000 \leq x \leq 0,004 \text{ м}$ . Форма поверхности  $W = f(x, w)$  демонстрирует характерное для оптически тонких слоёв при двустороннем облучении параболическое распределение с максимумами у обеих поверхностей слоя и минимумом в центральной части слоя.

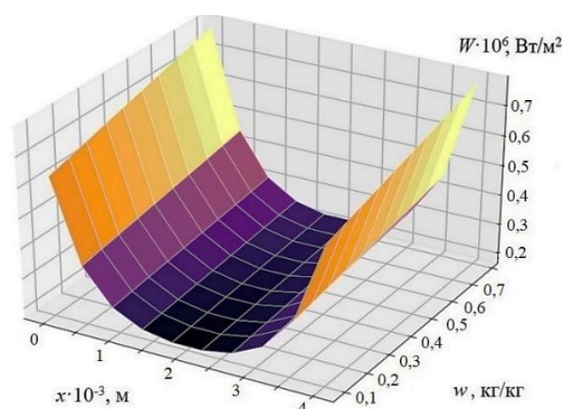


Рисунок 4. Поверхность  $W = f(x, w)$ ,  $\text{Вт/м}^3$  для пеносля томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина в диапазоне  $0,10 \leq w \leq 0,78 \text{ кг/кг}$  и  $0,000 \leq x \leq 0,004 \text{ м}$  при нагреве КГТ и  $E_n = 840 \text{ Вт/м}^2$

Figure 4. Surface  $W = f(x, w)$ ,  $\text{W/m}^3$  for a foam layer of tomato paste with the addition of a solution of ichthyogelatin in the range of  $0,10 \leq w \leq 0,78 \text{ kg/kg}$  and  $0,000 \leq x \leq 0,004 \text{ m}$  when heated by KGT and  $E_n = 840 \text{ W/m}^2$

При сокращении влажности от 0,78 до 0,10 кг/кг наблюдается уменьшение значений  $W$ . Данный эффект обусловлен снижением поглотительной способности продукта по мере сокращения количества влаги в нем. Сравнение кривых  $W = f(x)$  при  $w = \text{const}$  для пяти генераторов излучения (рисунок 5) показывает, что излучатель КГТ обеспечивает минимальную неоднородность распределения поглощённой энергии по глубине пенослоя. Для длинноволновых генераторов (НС, МП, ПГИИ, ТЭН) отношение значений  $W$  у поверхности и в центре пенослоя существенно выше, что свидетельствует о концентрации поглощения в поверхностных зонах и сопряжено с риском перегрева поверхности при высокой интенсивности подводимого потока.

Установленный характер зависимостей  $W = f(x, w)$  для пенослоя томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина качественно совпадает с аналогичными зависимостями, полученными для пенослоя ихтиожелатина [16] и других биополимерных материалов [10] и, вероятно, обусловлен специфическим оптическим поведением материала томатной пасты

в исследуемом диапазоне  $\lambda$ , нм, которое определяется высоким содержанием каротиноидов, прежде всего ликопина, обладающего характерными полосами поглощения в видимой и ближней ИК-области спектра, а также влагосвязывающей способностью ихтиожелатина.

Таким образом, полученные зависимости  $W = f(x, w)$  количественно характеризуют процесс поглощения ИК-излучения пенослоем исследуемого продукта и могут быть использованы при моделировании нестационарных температурных полей в обезвоживаемом материале, как компонент системы дифференциальных уравнений теплопереноса [10]. Применение излучателей КГТ (220 В) при конвективно-радиационной пеносушке вспененной томатной пасты с ихтиожелатином следует признать наиболее рациональным в сравнении с рассмотренными генераторами, поскольку в данном случае обеспечивается минимальная неоднородность нагрева по толщине слоя во всём диапазоне влажности продукта, что снижает вероятность термического повреждения каротиноидов и аскорбиновой кислоты в процессе влагоудаления [4].

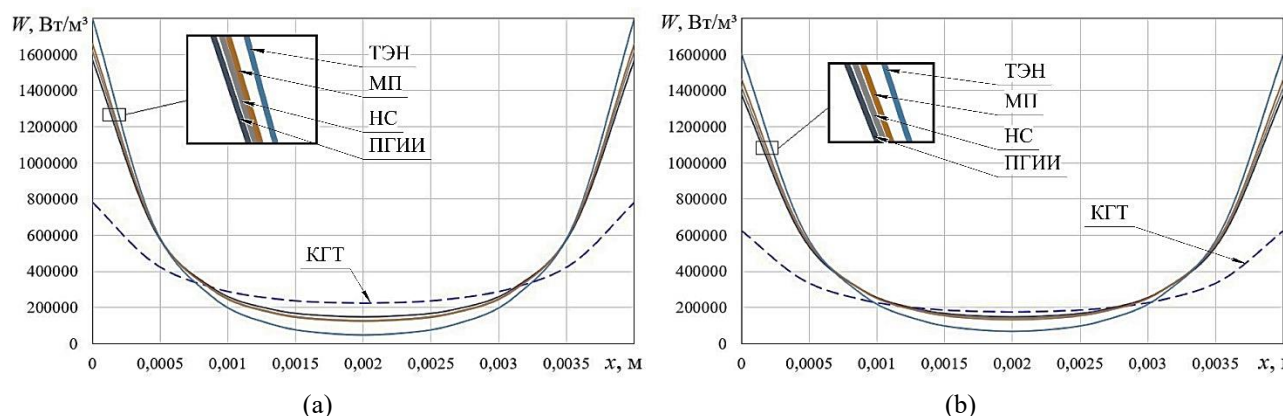


Рисунок 5. Кривые  $W = f(x)$  для влажного при  $w = 0,78$  кг/кг (а) и сухого при  $w = 0,10$  кг/кг (б) пенослоя томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина при нагреве различными генераторами и  $E_n = 840$  Вт/м<sup>2</sup>

Figure 5. Curves  $W = f(x)$  for wet at  $w = 0.78$  kg/kg (a) and dry at  $w = 0.10$  kg/kg (b) foam layer of tomato paste with the addition of ichthyogelatin solution when heated by different generators and  $E_n = 840$  W/m<sup>2</sup>

### Заключение

Экспериментально-аналитическим методом получены и проанализированы оптические и терморрадиационные характеристики оптически тонкого пенослоя томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина. Получены аппроксимирующие зависимости оптических характеристик  $R_\infty(w)$ ,  $L(w)$ , м<sup>-1</sup>,  $W = f(x, w)$ , Вт/м<sup>3</sup>, для пяти генераторов ИК-излучения (табл. 2) при двустороннем энергоподводе с суммарной плотностью подаваемого на продукт теплового потока  $E = 1680$  Вт/м<sup>2</sup>, справедливые в спектральном диапазоне  $800 \leq \lambda \leq 2500$  нм и в диапазоне влажности продукта  $0,10 \leq w \leq 0,78$  кг/кг.

По результатам сравнительного анализа полученных зависимостей, а также сопоставления эмиссионных характеристик генераторов и спектральной пропускательной способности пенослоя подтверждена целесообразность применения излучателей КГТ (220 В) для обеспечения наиболее равномерного прогрева продукта по толщине слоя во всём рассматриваемом диапазоне влажности. Полученные зависимости применимы для последующего моделирования нестационарных температурных полей в процессе конвективно-радиационной сушки пенослоя томатной пасты с добавлением раствора ихтиожелатина в качестве пенообразователя и стабилизатора. Результаты настоящего

исследования формируют научную основу для разработки технологии и оборудования для переработки томатной пасты в томатный порошок с использованием отечественного биополимерного пенообразователя из отходов рыбопереработки.

ЦКП «Структурная диагностика материалов» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт» при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт»

### Благодарности

В части исследования оптических свойств работа выполнена с использованием оборудования

### Литература

- 1 Ефремов Д.П., Жаркова И.М., Плотникова И.В., Иванчиков Д.С., Гизатова Н.В. Томаты: основные направления использования в пищевой промышленности (обзор) // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 1. С. 181–195. doi: 10.20914/2310-1202-2022-1-181-195
- 2 Kaundal G., Sharma K., Anand H. Processing, value addition and post-harvest technology of tomato: a scoping review on global and Indian perspective // Journal of Advances in Biology & Biotechnology. 2024. Vol. 27. No. 11. P. 339–347. doi: 10.9734/jabb/2024/v27i111619
- 3 Hossain M.A., Ahmed T., Ferdaus J., Zzaman W. Optimization of the foam-mat drying process to develop high-quality tomato powder: a response surface methodology approach // Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 21. Article e39811. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39811
- 4 Salanță L.C., Fărcaș A.C. Exploring the efficacy and feasibility of tomato by-products in advancing food industry applications // Food Bioscience. 2024. Vol. 62. Article 105567. doi: 10.1016/j.fbio.2024.105567
- 5 Kaur S.G., Singh M., Kaur P. Effect of operational parameters on physicochemical quality and recovery of spray-dried tomato powder // Journal of Food Processing and Preservation. 2019. doi: 10.1111/jfpp.14120
- 6 Szabo K., Teleky B.E., Ranga F., Simon E. et al. Bioaccessibility of microencapsulated carotenoids, recovered from tomato processing industrial by-products, using in vitro digestion model // LWT. 2021. Vol. 152. Article 112285. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112285
- 7 Anisuzzaman S.M., Joseph C.G., Nga J.L.H., Ismail F.N. Effect of carrier agents and operational parameters on the physical quality of spray-dried tomato powder: a review // ASEAN Journal of Chemical Engineering. 2022. Vol. 22. No. 2. P. 228–247. doi: 10.22146/ajche.71487
- 8 Belal Md., Hossain M.A., Mitra S., Zzaman W. Effect of foaming agent concentration and foam stabilizer on the foaming capacity and physical properties of tomato powder dried at different temperatures // Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences. 2023. Vol. 12. No. 3. Article e4741. doi: 10.55251/jmbfs.4741
- 9 Бурак Л.С. Традиционные и инновационные технологии переработки фруктов и овощей. Обзор предметного поля // The Scientific Heritage. 2025. № 153. С. 64–77. doi: 10.5281/zenodo.14729650
- 10 Медведев А.В. Технология инфракрасной сушки жидких материалов // Дальневосточный аграрный вестник. 2024. Т. 18. № 1. С. 74–82. doi: 10.22450/1999-6837-2024-18-1-74-82
- 11 Афонькина В.А., Попов В.М., Левинский В.Н. Результаты исследований качественных показателей процесса ИК-сушки томатов с установкой сроков хранения // Вестник КрасГАУ. 2018. № 4 (139). С. 174–180.
- 12 Быкова С.М., Очиров В.Д., Алтухов И.В. Получение томатного порошка с использованием инфракрасной обработки и сушки // Вестник КрасГАУ. 2024. № 1. С. 169–175.
- 13 Пат. 2722210 РФ, МПК С09Н 3/00. Способ получения рыбного желатина / О.С. Якубова, А.А. Бекешева; заявл. 16.12.2019; опублик. 28.05.2020. Бюл. № 16.
- 14 Дяченко Н.П., Максименко Ю.А., Алексанян И.Ю., Дяченко В.П., Набатов Б.В., Дяченко Э.П. Особенности поглощения энергии инфракрасного (радиационного) излучения оптически тонким слоем вспененного ихтиожелатина из чешуи промысловой (частиковой) и прудовой рыбы // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2026. № 1. С. 109–118. doi: 10.24143/2073-5529-2026-1-109-118
- 15 Farid E., Mounir S., Talaat E. Effect of foaming parameters on the physical and phytochemical properties of tomato powder // Food Science and Biotechnology. 2022. Vol. 31. No. 11. P. 1399–1408. doi: 10.1007/s10068-022-01125-9
- 16 Puente-Díaz L., Spolmann O., Nocetti D., Zura-Bravo L., Lemus-Mondaca R. Effects of infrared-assisted Refractance Window drying on the drying kinetics, microstructure, and color of Physalis fruit purée // Foods. 2020. Vol. 9. No. 3. Article 343. doi: 10.3390/foods9030343
- 17 Vasudevan N., Sulaiman R., Chong G.H., Adzahan N.A., Shaari N.A. Development of foam-mat dried soursop powder using arabic gum and fish gelatin as foaming agent // Food Research. 2020. Vol. 4 (Suppl. 1). P. 237–243. doi: 10.26656/fr.2017.4(S1).S16
- 18 Yang H., Wang H., Huang M., Cao G. et al. Improving foaming properties of fish gelatin by neutral protease and gum arabic // npj Science of Food. 2026. Vol. 10. Article 17. doi: 10.1038/s41538-026-00773-z
- 19 Praveen S.S.D., Kovács Z. Trends in refractance window drying: effects on nutritional and bioactive properties of fruits and vegetables // Journal of Food Processing and Preservation. 2025. Vol. 2025. Article 3686474. doi: 10.1155/jfpp/3686474
- 20 Demiray E., Tulek Y., Yilmaz Y. Degradation kinetics of lycopene, β-carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying // LWT – Food Science and Technology. 2013. Vol. 50. No. 1. P. 172–176. doi: 10.1016/j.lwt.2012.06.001

### References


- 1 Efremov D.P., Zharkova I.M., Plotnikova I.V., Ivanchikov D.S., Gizatova N.V. Tomatoes: main directions of use in the food industry (review). Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022. vol. 84. no. 1. pp. 181–195. doi: 10.20914/2310-1202-2022-1-181-195 (in Russian).
- 2 Kaundal G., Sharma K., Anand H. Processing, value addition and post-harvest technology of tomato: a scoping review on global and Indian perspective. Journal of Advances in Biology & Biotechnology. 2024. vol. 27. no. 11. pp. 339–347. doi: 10.9734/jabb/2024/v27i111619.

- 3 Hossain M.A., Ahmed T., Ferdaus J., Zzaman W. Optimization of the foam-mat drying process to develop high-quality tomato powder: a response surface methodology approach. *Heliyon*. 2024. vol. 10. no. 21. article e39811. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39811.
- 4 Salanță L.C., Fărcaș A.C. Exploring the efficacy and feasibility of tomato by-products in advancing food industry applications. *Food Bioscience*. 2024. vol. 62. article 105567. doi: 10.1016/j.fbio.2024.105567.
- 5 Kaur S.G., Singh M., Kaur P. Effect of operational parameters on physicochemical quality and recovery of spray-dried tomato powder. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2019. [Online first]. doi: 10.1111/jfpp.14120.
- 6 Szabo K., Teleky B.E., Ranga F., Simon E. et al. Bioaccessibility of microencapsulated carotenoids, recovered from tomato processing industrial by-products, using in vitro digestion model. *LWT*. 2021. vol. 152. article 112285. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112285.
- 7 Anisuzzaman S.M., Joseph C.G., Nga J.L.H., Ismail F.N. Effect of carrier agents and operational parameters on the physical quality of spray-dried tomato powder: a review. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*. 2022. vol. 22. no. 2. pp. 228–247. doi: 10.22146/ajche.71487.
- 8 Belal Md., Hossain M.A., Mitra S., Zzaman W. Effect of foaming agent concentration and foam stabilizer on the foaming capacity and physical properties of tomato powder dried at different temperatures. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2023. vol. 12. no. 3. article e4741. doi: 10.55251/jmbfs.4741.
- 9 Burak L.Ch. Traditional and innovative technologies for processing fruits and vegetables. Scoping review. *The Scientific Heritage*. 2025. no. 153. pp. 64–77. doi: 10.5281/zenodo.14729650 (in Russian).
- 10 Medvedev A.V. Technology of infrared drying of liquid materials. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2024. vol. 18. no. 1. pp. 74–82. doi: 10.22450/1999-6837-2024-18-1-74-82 (in Russian).
- 11 Afonkina V.A., Popov V.M., Levinsky V.N. Results of studies of quality indicators of the process of IR drying of tomatoes with determination of storage periods. *Bulletin of KrasGAU*. 2018. no. 4 (139). pp. 174–180. (in Russian).
- 12 Bykova S.M., Ochirov V.D., Altukhov I.V. Production of tomato powder using infrared treatment and drying. *Bulletin of KrasGAU*. 2024. no. 1. pp. 169–175. (in Russian).
- 13 Patent no. 2722210 RF, IPC C09H 3/00. Method for producing fish gelatin. Yakubova O.S., Bekesheva A.A.; filed 16.12.2019; publ. 28.05.2020. Bull. no. 16. (in Russian).
- 14 Dyachenko N.P., Maksimenko Yu.A., Aleksanyan I.Yu., Dyachenko V.P., Nabatov B.V., Dyachenko E.P. Features of absorption of infrared (radiation) energy by an optically thin layer of foamed ichthyogelatin from scales of commercial (partial) and pond fish. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries*. 2026. no. 1. pp. 109–118. doi: 10.24143/2073-5529-2026-1-109-118 (in Russian).
- 15 Farid E., Mounir S., Talaat E. Effect of foaming parameters on the physical and phytochemical properties of tomato powder. *Food Science and Biotechnology*. 2022. vol. 31. no. 11. pp. 1399–1408. doi: 10.1007/s10068-022-01125-9.
- 16 Puente-Díaz L., Spolmann O., Nocetti D., Zura-Bravo L., Lemus-Mondaca R. Effects of infrared-assisted Refractance Window drying on the drying kinetics, microstructure, and color of Physalis fruit purée. *Foods*. 2020. vol. 9. no. 3. article 343. doi: 10.3390/foods9030343.
- 17 Vasudevan N., Sulaiman R., Chong G.H., Adzahan N.A., Shaari N.A. Development of foam-mat dried soursop powder using arabic gum and fish gelatin as foaming agent. *Food Research*. 2020. vol. 4 (suppl. 1). pp. 237–243. doi: 10.26656/fr.2017.4(S1).S16.
- 18 Yang H., Wang H., Huang M., Cao G. et al. Improving foaming properties of fish gelatin by neutral protease and gum arabic. *npj Science of Food*. 2026. vol. 10. article 17. doi: 10.1038/s41538-026-00773-z.
- 19 Praveen S.S.D., Kovács Z. Trends in refractance window drying: effects on nutritional and bioactive properties of fruits and vegetables. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2025. vol. 2025. article 3686474. doi: 10.1155/jfpp/3686474.
- 20 Demiray E., Tulek Y., Yilmaz Y. Degradation kinetics of lycopene,  $\beta$ -carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying. *LWT – Food Science and Technology*. 2013. vol. 50. no. 1. pp. 172–176. doi: 10.1016/j.lwt.2012.06.001.


#### Сведения об авторах

**Вячеслав П. Дяченко** аспирант, кафедра технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, dyachenko.1999g@mail.ru

**Алексанян И. Юрьевич** д.т.н., профессор, кафедра технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, 16081960igor@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

**Эдуард П. Дяченко** к.т.н., старший аналитик, отдел аналитики научно-технических проектов и мер государственной поддержки, Институт медицинских материалов, ул. Spartakovskaya, 24, г. Москва, 105066, Россия, amed-nauka@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5518-911X>

**Борис В. Набатов** к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Ленинский проспект, 59, г. Москва, 119333, Россия, bnabatov@crys.ras.ru

#### Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат


#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


#### Information about authors

**Vyacheslav P. Diachenko** Postgraduate Student, Department of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, dyachenko.1999g@mail.ru

**Igor Yu. Aleksanyan** Dr. Sci. (Engin.), professor, Department of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, 16081960igor@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

**Eduard P. Diachenko** Cand. Sci. (Engin.), Senior Analyst, Department of Analysis of Scientific and Technical Projects and Government Support Measures, Institute of Medical Materials, Spartakovskaya Street, Bldg. 24, Moscow, 105066, Russia, amed-nauka@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5518-911X>

**Boris V. Nabatov** Cand. Sci. (Phys.- Math.), Senior Researcher, Department of the A.V. Shubnikov Institute of Crystallography of the Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics, National Research Centre «Kurchatov Institute», Leninsky Prospekt, Bldg. 59, Moscow, 119333, Russia, bnabatov@crys.ras.ru

#### Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 30/03/2026	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2026
Received 30/03/2026	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2026