

БИОТЕХНОЛОГИИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ, ЛЕКАРСТВЕННЫХ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ / BIOTECHNOLOGY OF FOOD PRODUCTS, MEDICINAL AND BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.33>

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОРАДИАЦИОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯКОТИ ТОМАТА

Научная статья

Дяченко В.П.¹, Александян И.Ю.², Дяченко Э.П.^{3,*}, Набатов Б.В.⁴, Тезин А.В.⁵

³ ORCID : 0000-0001-5518-911X;

^{1,2} Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Российская Федерация

^{3,5} Институт медицинских материалов, Москва, Российская Федерация

⁴ Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (amed-nauka[at]yandex.ru)

Аннотация

Изучены свойства мякоти плодов томата, как исходных данных для разработки режимов, позволяющих интенсифицировать процесс сушки томата при объемном инфракрасном (ИК) энергоподводе. Исследования проведены для диапазонов влажности $0,06 \leq w \leq 0,92$ кг/кг, толщины слоя продукта $0,002 \leq h \leq 0,004$ м и спектрального диапазона $800 \leq \lambda \leq 2500$ нм с использованием UV-Vis-NIR спектрофотометра Cary 5000 (Varian) с приставкой диффузного рассеяния (интегрирующей сферой) DRA-2500 и численного метода усредненных оптических и терморadiационных характеристик материала. Получены значения терморadiационных свойств R_λ и T_λ образцов (пластин) мякоти томата в зависимости от длины волны инфракрасного спектра λ , мкм. Выполнены расчет и анализ интегральных оптических свойств исследуемого продукта для случаев его нагрева излучателями КГТ и нихромовой спиралью.

Ключевые слова: инфракрасная сушка, томат, терморadiационные свойства, оптические свойства, спектрофотометр.

A STUDY OF THERMORADIATION AND OPTICAL PROPERTIES OF TOMATO PULP

Research article

Dyachenko V.P.¹, Aleksanyan I.Y.², Dyachenko E.P.^{3,*}, Nabatov B.V.⁴, Tezin A.V.⁵

³ ORCID : 0000-0001-5518-911X;

^{1,2} Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

^{3,5} Institute of Medical Materials, Moscow, Russian Federation

⁴ Institute of Crystallography named after. A.V. Shubnikov Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (amed-nauka[at]yandex.ru)

Abstract

The properties of tomato fruit pulp have been studied as initial data for the development of regimes allowing to intensify the process of tomato drying under volumetric infrared (IR) energy supply. Research has been carried out for moisture ranges $0.06 \leq w \leq 0.92$ kg/kg, product layer thickness $0.002 \leq h \leq 0.004$ m and spectral range $800 \leq \lambda \leq 2500$ nm using UV-Vis-NIR spectrophotometer Cary 5000 (Varian) with diffuse scattering attachment (integrating sphere) DRA-2500 and numerical method of averaged optical and thermal radiation characteristics of the material. The values of thermoradiation properties R_λ and T_λ of samples (plates) of tomato pulp depending on the wavelength of infrared spectrum λ , μm were obtained. Calculation and analysis of integral optical properties of the investigated product for cases of its heating by CT and nichrome spiral radiators were performed.

Keywords: infrared drying, tomato, thermal radiation properties, optical properties, spectrophotometer.

Введение

Томат является одним из наиболее распространенных на отечественном рынке овощей, что обусловливается продуктивностью, вкусовыми качествами и биологической ценностью продукта [1]. Одним из наиболее простых, надежных и перспективных способов переработки и консервирования плодов томата является сушка при инфракрасном (ИК) энергоподводе [2], [3], [4], [5].

Применение ИК (электромагнитного) энергоподвода для получения концентратов является перспективным подходом в пищевой промышленности [3], [4], [5],[6]. Несмотря на указанные преимущества, развитие техники ИК сушки томата сдерживается недостаточной изученностью процесса переноса энергии излучения в тканях томата, неполнотой сведений о его оптических свойствах [5], [6], [7].

Цель настоящих исследований – это изучение терморadiационных и оптических свойств мякоти томата, как исходных данных для разработки режимов высокоинтенсивной сушки указанного продукта при объемном ИК энергоподводе.

Объекты и методы исследования

В качестве исследуемого продукта использовались плоды томата сорта Сливка гигант. Выбор сорта обусловлен характеристиками плода, наиболее пригодными для приготовления объектов исследований, обеспечивающих возможность спектрофотометрических измерений томата как объекта сушки при ИК энергоподводе. Плоды указанного сорта пригодны для равномерного нарезания и обеспечения равномерной сушки, характеризуются, цилиндрической формой, сравнительно малым количеством пульпы, изотропностью мякоти томата по толщине плода, а также высокой плотностью мякоти. Объекты исследования (далее – образцы) представляли собой пластины заданной толщины и влажности, а именно – пластины мякоти томата толщиной h , м, полученные:

- непосредственно нарезанием предварительно освобожденных от кожицы плодов томата с последующим удалением пульпы и семян. В данном случае влажность образцов соответствовала влажности нативной мякоти томата w_n , кг/кг;

- высушиванием также предварительно освобожденных от кожицы, нарезанных на пластины и очищенных от пульпы и семян плодов томата. Сушка пластин осуществлялась при двустороннем ИК энергоподводе с использованием режимов влагоудаления, приведенных в работе [8] до достижения образцами требуемой величины влажности w_n , кг/кг.

Исследования проводились в два этапа для диапазонов влажности $0,06 \leq w \leq 0,92$ кг/кг, толщины слоя $0,002 \leq h \leq 0,004$ м продукта и ИК области спектра $800 \leq \lambda \leq 2500$ нм с использованием литературных данных об эмиссионных характеристиках (спектрах излучения) ИК излучателей, приведенных в работах [5], [9], [10].

Величина влажности образцов w , кг/кг определялась титрованием по методу Карла Фишера. Наименьшее значение влажности исследуемого продукта обусловлен требованиями к качеству сухого томата, приведенными в ГОСТ 32065-2013 и результатами анализа гигроскопических характеристик продукта [6]. Максимальное значение влажности определено эмпирически, соответствует усредненной влажности образцов мякоти нативного томата. Толщина слоя h , м соответствует оптически тонкому слою, её выбор обусловлен результатами экспериментальных исследований конвективно-радиационной сушки томата [8]. Спектральный диапазон $800 \leq \lambda \leq 2500$ нм выбран на основе литературных данных [5], [9], [10] и технической возможности экспериментального исследования.

На первом этапе на спектрофотометре UV-Vis-NIR Cary 5000 (Varian) с приставкой интегрирующей сферы DRA-2500 эмпирически для указанных образцов были получены зависимости спектральных направленно-полусферических терморрадиационных свойств R_λ и T_λ слоя мякоти томата от длины волны ИК диапазона λ , нм. На втором этапе с использованием полученных на спектрофотометре данных, для исследуемых диапазонов ИК области спектра, влажности и толщины слоя продукта, выполнен расчет интегральных оптических характеристик. Для расчета использован метод усредненных оптических и терморрадиационных характеристик материала, как наиболее простой, приемлемый для инженерных расчетов метод [5].

Данные о распределении объемной плотности поглощенной энергии излучения по глубине оптически тонкого слоя мякоти томата $W=f(x,w)$, Вт/м³ были рассчитаны по формуле, предложенной в работе [5] для процесса влагоудаления при двустороннем ИК энергоподводе:

$$W(x, w) = L(x, w) \cdot E_{n1} \frac{1 - R_\infty(w)}{1 - \psi^2(w, x)} \left[\frac{\exp(-L(w, x) \cdot x) - \frac{\psi^2(w, x)}{R_\infty(w)} \exp(L(w, x) \cdot x)}{R_\infty(w)} \right] + L(h - x, w) \cdot E_{n2} \frac{1 - R_\infty(w)}{1 - \psi^2(w, h - x)} \left[\frac{\exp(-L(w, h - x) \cdot (h - x)) - \frac{\psi^2(w, h - x)}{R_\infty(w)} \exp(L(w, h - x) \cdot (h - x))}{R_\infty(w)} \right], \quad (1)$$

где x – координата толщины слоя (глубина оптически тонкого слоя) мякоти томата, м, максимальная величина которой соответствует толщине слоя $h=0,004$ м;

$E_{n1}=E_{n2}$ – плотность теплового потока, падающего на одну сторону слоя, Вт/м²;

R_∞ – величина, характеризующая спектральную отражательную способность оптически полубесконечного слоя;

$\psi = R_\infty(w) \cdot \exp(-L(w, x) \cdot x)$.

Результаты и их обсуждение

В результате исследований для мякоти томата различной толщины h , м и влажности w , кг/кг получены величины направленно-полусферических терморрадиационных свойств R_λ и T_λ в спектральном диапазоне $800 \leq \lambda \leq 2500$ нм. Для повышения точности каждое измерение повторялось три раза. Относительная ошибка при определении R_λ и T_λ не превышала $\varepsilon = 9,1\%$. Примеры графической интерпретации полученных значений направленно-полусферических терморрадиационных характеристик R_λ и T_λ в указанном спектральном диапазоне изображены на рисунках 1-2.

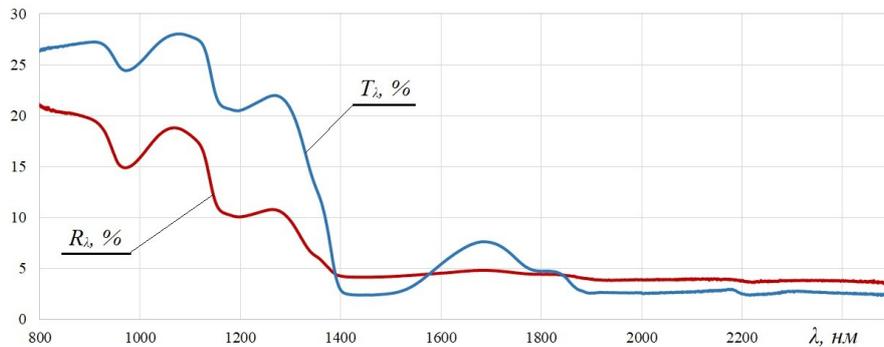


Рисунок 1 - Отражательная R_λ и пропускательная T_λ способности мякоти томата при толщине слоя $h_n = 0,004$ мм и влажности продукта $w_n = 0,92$ кг/кг
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.33.1>

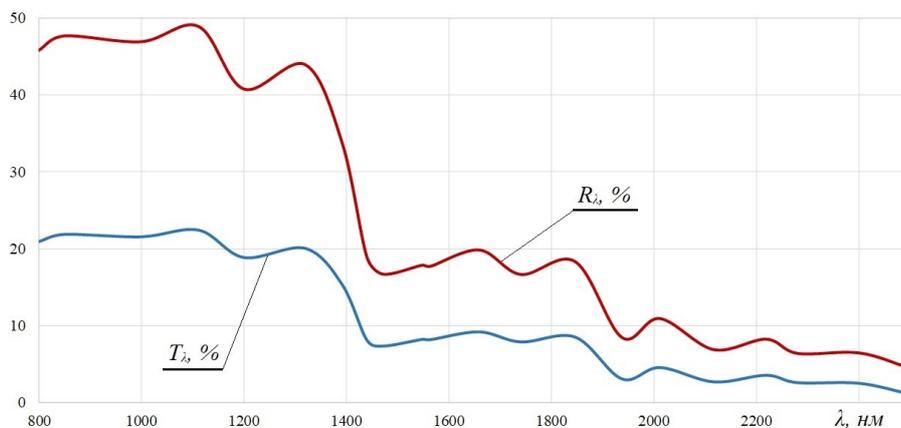


Рисунок 2 - Отражательная R_λ и пропускательная T_λ способности мякоти томата при толщине слоя $h_n = 0,004$ мм и влажности продукта $w_n = 0,06$ кг/кг
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.33.2>

С использованием полученных данных о направленно-полусферических терморadiационных свойствах исследуемого продукта, а также литературных данных о спектрах излучения излучателей были уравнения следующих оптических свойств для процесса сушки мякоти томата с начальной влажностью $w_n = 0,92$ кг/кг и толщиной слоя $h_n = 0,004$ м при объемном ИК энергоподводе.

1) Уравнение, характеризующее зависимость отражательной интегральной способности оптически полубесконечного слоя $R_\infty(w)$ от влажности продукта w , кг/кг:

- для процесса сушки с использованием ИК излучателей КГТ-220-1000 (далее – излучатели КГТ):

$$R_\infty(w) = -0,2631 \cdot w + 0,3593, \quad (2)$$

- для случая процесса сушки с использованием нихромовой спирали в кварцевой трубке (далее – нихромовая спираль):

$$R_\infty(w) = -0,1477 \cdot w + 0,1863. \quad (3)$$

2) Уравнение, характеризующее зависимость коэффициента эффективного ослабления потока излучения по мере распространения в оптически бесконечно толстом слое L , m^{-1} от влажности продукта w , кг/кг и координаты толщины слоя $0,000 \leq x \leq 0,004$ м:

- для случая процесса сушки с использованием излучателей КГТ:

$$L(w, x) = (-0,304 \cdot w - 0,815) \cdot (x \cdot 10^3)^4 + (2,434 \cdot w + 6,521) \cdot (x \cdot 10^3)^3 + (-4,025 \cdot w - 4,429) \cdot (x \cdot 10^3)^2 + (-35,572 \cdot w - 34,451) \cdot (x \cdot 10^3) + (3,767 \cdot w + 545,634), \quad (4)$$

- для случая процесса сушки с использованием нихромовой спирали:

$$L(w, x) = (-0,710 \cdot w - 1,523) \cdot (x \cdot 10^3)^4 + (5,677 \cdot w + 12,187) \cdot (x \cdot 10^3)^3 + (-13,566 \cdot w - 19,186) \cdot (x \cdot 10^3)^2 + (-8,845 \cdot w - 20,753) \cdot (x \cdot 10^3) + (91,640 \cdot w + 747,662) \quad (5)$$

С использованием полученных уравнений (2), (3), (4) и (5) по формуле (1) для каждого из указанных ИК излучателей рассчитана соответствующая зависимость $W=f(x,w)$, Вт/м³ по глубине оптически тонкого слоя мякоти томата. Расчет осуществлялся для рационального значения плотности падающего теплового потока с одной стороны слоя $E_{n1}=E_{n2}=3240$ Вт/м², определенного в результате экспериментальных исследований [15]. На рисунке 3 изображена эволюция изменения $W=f(x,w)$, Вт/м³ по глубине оптически тонкого слоя $0,000 \leq x \leq 0,004$ м в диапазоне $0,06 \leq w \leq 0,92$ кг/кг при объемном ИК облучении продукта нихромовой спиралью (а) и генераторами КГТ (б).

В результате анализа характера полученных зависимостей $W=f(x,w)$ для мякоти томата установлено, что при $w = \text{const}$ функция $W=f(x)$ имеет вид параболы с минимумом в точке экстремума, соответствующей середине толщины слоя (рисунок 3). При нагреве продукта нихромовой спиралью плотность поглощенной энергии излучения по толщине слоя в приповерхностных слоях существенно превышает значения аналогичного параметра при нагреве продукта излучателями КГТ. Указанная особенность обусловлена соотношением спектральных характеристик излучателей и облучаемого продукта. Вместе с тем, характер изображенных на рисунке 3 кривых свидетельствует об обеспечении излучателями КГТ в сравнении с нихромовой спиралью наиболее равномерного распределения плотности поглощенной энергии по глубине оптически тонкого слоя. Как следствие, применение излучателей КГТ обеспечивает наиболее равномерный прогрев продукта в процессе сушки и, соответственно, более качественное проведение процесса.

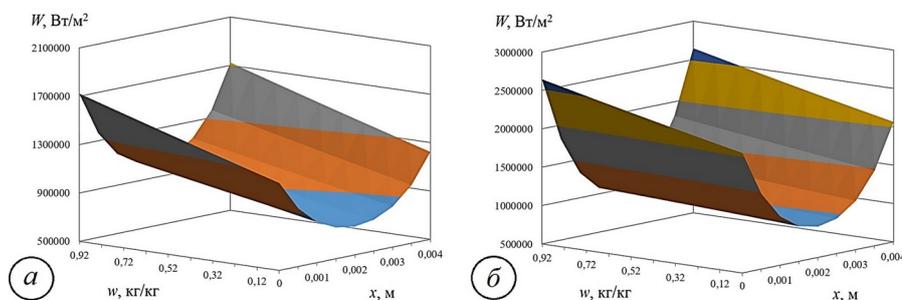


Рисунок 3 - Эволюция изменения объемной плотности поглощенной энергии излучения $W(x,w)$ по толщине слоя мякоти томата с влажностью $0,06 \leq w \leq 0,92$ кг/кг в диапазоне $0,000 \leq x \leq 0,004$ м при $E_{n1}=E_{n2}=3240$ Вт/м² с использованием:

а) излучателей КГТ; б) нихромовой спирали
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.33.3>

Изучение терморadiационных и оптических свойств мякоти томата и результатов анализа характера изменения объемной плотности поглощенной энергии излучения по глубине слоя продукта позволили выбрать следующие технические решения, для реализации и последующего совершенствования процесса ИК сушки мякоти томата: в качестве ИК излучателя – излучатели КГТ; оптимальный диапазон длины волны ИК излучателей – $1100 \leq \lambda \leq 1300$ нм, соответствующий максимальной интенсивности излучения, определяющей напряжение на ИК излучателе $U=220$ В [9]. Кроме того, в результате исследований подтвержден выбор толщины слоя продукта $h \leq 0,004$ м, обеспечивающего высокоинтенсивную сушку плодов в оптически тонком слое.

Заключение

Изучены терморadiационные и оптически свойства мякоти плодов томата. С использованием современного спектрофотометрического оборудования получены значения спектральных терморadiационных свойств R_λ и T_λ слоя образцов (пластин) в ближнем ИК диапазоне λ , нм. Расчетным путем на основе эмпирических данных получены уравнения, характеризующие зависимости основных оптических характеристик продукта от влияющих на них параметров. Для реализации процесса высокоинтенсивной ИК сушки выбраны излучатели (КГТ), оптимальный диапазон длины их волны ($1100 \leq \lambda \leq 1300$ нм), а также параметры оптически тонкого слоя ($h \leq 0,004$ м). Результаты проведенных исследований, включая выбранные технические решения реализации процесса, могут быть использованы для усовершенствования способов ИК сушки томата и проектировании сушильной техники для получения томатных концентратов [5], [6], [7], [8].

Финансирование

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Структурная диагностика материалов» при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт» (в части исследования оптических свойств).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

This work was carried out using the equipment of Shared Research Center "Structural diagnostics of materials" with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment of Kurchatov Complex Crystallography and photonics, NRC "Kurchatov Institute" (in terms of the optical properties studying).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Ali M.Y. Nutritional composition and bioactive compounds in tomatoes and their impact on human health and disease: a review / M.Y. Ali, A.A.I. Sina, S.S. Khandker et al. // *Foods*. — 2021. — 1: 45. DOI: 10.3390/foods10010045.
2. Mencarelli A. Two-stage drying of tomato based on physical parameter kinetics: operative and qualitative optimization / A. Mencarelli, F. Marinello, A. Marini // *Eur. Food Res. Technol.* — 2023. — 249. — p. 2253–2264. DOI: 10.1007/s00217-023-04288-9.
3. Алтухов И.В. Влияние ИК-излучения на качественные показатели томатного порошка / И.В. Алтухов, С.М. Быкова, А.М. Свинаярева // *Вестник КрасГАУ*. — 2021. — 11 (176). — с. 205–211. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-11-205-211.
4. Алексанян И.Ю. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование / И.Ю. Алексанян, А.А. Буйнов — Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004. — 380 с.
5. Максименко Ю.А. Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии : дис. ...-ра : 05.18.12 : защищена 2016-06-16 : утв. 2016-06-16 / Ю.А. Максименко — Воронеж: 2016.— 502 с.
6. Алтухов И.В. Пропускательная способность корнеклубнеплодов / И.В. Алтухов, В.Д. Очиров, В.А. Федотов и др. // *Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии*. — 2014. — 60. — с. 101–105.
7. Дяченко Э.П. Исследование влияния конвективного энергоподвода на интенсивность инфракрасной сушки плодов томата / Э.П. Дяченко, И.Ю. Алексанян, О.А. Разин и др. // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. — 2019. — 4. — с. 40–47. DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-4-40-47.
8. Ильясов С.Г. Методы определения оптических и терморadiационных характеристик пищевых продуктов / С.Г. Ильясов, В.В. Красников — Москва: Пищевая промышленность, 1972. — 175 с.
9. Alfeo V. Cherry tomato drying: sun versus convective oven / V. Alfeo, D. Planeta, S. Velotto et al. // *Horticulturae*. — 2021. — 3:40. DOI: 10.3390/horticulturae7030040.
10. Гинзбург А.С. Спектральные характеристики генераторов излучения и облучаемых материалов / А.С. Гинзбург, В.В. Красников // *Электротермия*. — 1965. — 48. — с. 34–37.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ali M.Y. Nutritional composition and bioactive compounds in tomatoes and their impact on human health and disease: a review / M.Y. Ali, A.A.I. Sina, S.S. Khandker et al. // *Foods*. — 2021. — 1: 45. DOI: 10.3390/foods10010045.
2. Mencarelli A. Two-stage drying of tomato based on physical parameter kinetics: operative and qualitative optimization / A. Mencarelli, F. Marinello, A. Marini // *Eur. Food Res. Technol.* — 2023. — 249. — p. 2253–2264. DOI: 10.1007/s00217-023-04288-9.
3. Altuhov I.V. Vlijanie IK-izluchenija na kachestvennye pokazateli tomatnogo poroshka [IR radiation influence on the tomato powder qualitative indicators] / I.V. Altuhov, S.M. Bykova, A.M. Svinareva // *Bulletin of KrasSAU*. — 2021. — 11 (176). — p. 205–211. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-11-205-211. [in Russian]
4. Aleksanjan I.Ju. Vysokointensivnaja sushka pischevyh produktov. Penosushka. Teorija. Praktika. Modelirovanie [High intensity food drying. Foam dryer. Theory. Practice. Modeling] / I.Ju. Aleksanjan, A.A. Bujnov — Astrahan': Izd-vo AGTU, 2004. — 380 p. [in Russian]
5. Maksimenko Ju.A. Razvitie nauchno-prakticheskikh osnov i sovershenstvovanie protsessov sushki rastitel'nogo syr'ja v dispergirovannom sostojanii [Development of scientific and practical foundations and improvement of drying processes of plant materials in a dispersed state] : dis....of PhD in Engineering : 05.18.12 : defense of the thesis 2016-06-16 : approved 2016-06-16 / Ju.A. Maksimenko — Voronezh: 2016.— 502 p. [in Russian]
6. Altuhov I.V. Propuskatel'naja sposobnost' korneklubneplodov [Conducting ability of tuberous roots] / I.V. Altuhov, V.D. Ochirov, V.A. Fedotov et al. // *Bulletin of the Irkutsk State Agricultural Academy*. — 2014. — 60. — p. 101–105. [in Russian]
7. Djachenko E.P. Issledovanie vlijanija konvektivnogo energopodvoda na intensivnost' infrakrasnoj sushki plodov tomata [The effect of convective energy supply on the infrared drying intensity of tomatoes] / E.P. Djachenko, I.Ju. Aleksanjan, O.A. Razin et al. // *Processes and Food Production Equipment*. — 2019. — 4. — p. 40–47. DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-4-40-47. [in Russian]

8. Il'jasov S.G. Metody opredelenija opticheskikh i termoradiatsionnykh harakteristik pischevykh produktov [Methods for determining the optical and thermoradiation characteristics of food products] / S.G. Il'jasov, V.V. Krasnikov — Moskva: Pischevaja promyshlennost', 1972. — 175 p. [in Russian]
9. Alfeo V. Cherry tomato drying: sun versus convective oven / V. Alfeo, D. Planeta, S. Velotto et al. // Horticulturae. — 2021. — 3:40. DOI: 10.3390/horticulturae7030040.
10. Ginzburg A.S. Spektral'nye harakteristiki generatorov izluchenija i obluchaemykh materialov [Spectral characteristics of radiation generators and irradiated materials] / A.S. Ginzburg, V.V. Krasnikov // Electrothermia. — 1965. — 48. — p. 34–37. [in Russian]