



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК

Н.А. Миронова

Донецкий национальный университет экономики и торговли имени  
Михаила Туган-Барановского, г. Донецк, ДНР

ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-5717-1116>, [Mironova\\_nad@mail.ru](mailto:Mironova_nad@mail.ru)

**Резюме:** В работе проведены результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик плодовых косточек при их сушке инфракрасным излучением в виброкипящем слое. Промышленная переработка сырья биологического происхождения представляет собой сложный комплекс последовательно выполняемых и взаимосвязанных механических, теплофизических, биотехнологических и других специфических процессов, и требует в условиях жесткой конкуренции на рынке повышения эффективности теплообмена с выработкой качественных, полноценных и безопасных в санитарном отношении пищевых продуктов. Одним из малоисследованных сырьевых источников питательных веществ являются плодовые косточки. Определение коэффициента теплопроводности осуществлялось зондовым методом. Для определения плотности плодовых косточек использовали пикнометрический метод. Для определения удельной теплоемкости плодовые косточки рассматривались как продукт, состоящий из следующих составляющих: воды, масла, белков, углеводов и целлюлозы. Каждая *i*-тая составляющая имеет свое влияние на общую удельную теплоемкость пропорционально массовой доли  $\omega_i$  в продукте. На основе полученных экспериментальных данных произведен анализ закономерностей изменения теплофизических характеристик по мере удаления влаги из плодовых косточек, получены соответствующие эмпирические зависимости, описывающие данный процесс. Полученные значения теплофизических характеристик плодовых косточек позволяют установить кинетические закономерности процесса нагрева. Результаты могут быть использованы для проведения комплексного инженерного расчета установки для сушки плодовых косточек на плодоовощных и консервных предприятиях.

**Ключевые слова:** плодовые косточки; теплофизические характеристики; эмпирические зависимости; инфракрасная сушка; виброкипящий слой.

**Благодарности:** работа выполнена по результатам Госбюджетной темы Г 2017-5 Государственной организации высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», кафедры оборудования пищевых производств «Исследование процессов переработки нетрадиционного пищевого и лекарственного сырья».

**Для цитирования:** Миронова Н.А. Экспериментальные исследования теплофизических характеристик плодовых косточек // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 19-28. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-19-28.

## RESEARCH OF THE HEAT OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF FRUIT OSSICLES

NA Mironova

Donetsk national university of economics and trade named after  
Mykhayilo Tugan-Baranovsky, Donetsk, DPR

ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-5717-1116>, [Mironova\\_nad@mail.ru](mailto:Mironova_nad@mail.ru)

**Abstract:** Utilization of fruit seeds plays a special role, since they are a valuable raw material for the oil and fat industry, at the enterprises of which the complex processing of seeds is carried out:

oil is obtained from kernels, crumbs and powder are obtained from shells. Before placing the seeds in the oil and fat enterprises, they must be cleaned of impurities and dried, since the seeds extracted from the fruits have an increased humidity of 25-60% and contain a significant amount of impurities in the form of pulp and squeezes. However, due to the lack of specialized equipment for drying fruit seeds in canneries, their supply to the kernel oil plants is declining every year. In this case, tons of seeds are simply destroyed. Attempts to use existing industrial dryers proved to be ineffective, since they do not take into account the structural features of fruit seeds, and are also not very adapted to significant fluctuations in the moisture of raw seeds and the unevenness of their receipt on drying. The most appropriate method of drying fruit seeds is the use of infrared radiation and a vibro-boiling layer.

**Keywords:** fruitossicles, thermophysical characteristics, empirical dependencies, infrared drying, vibro boiling layer.

**Acknowledgments:** the work was carried out according to the results of the State budget theme G 2017-5 State Organization of Higher Professional Education «Donetsk national university of economics and trade named after Mykhayilo Tugan-Baranovsky», of food production equipment “Study of the processing of non-traditional food and medicinal raw materials”.

**For citation:** Mironova NA. Research of the heat of physical characteristics of fruit ossicles. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):19-28. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-19-28.

## Введение

Исследования теоретических и прикладных проблем тепломассопереноса, связанных с совершенствованием энергосберегающих технологий термической сушки, несмотря на самое широкое внимание и длительный период реализации до настоящего времени по многим аспектам остаются актуальными задачами промышленной теплоэнергетики. С их решением непосредственно связано развитие и качественное совершенствование высокоэффективных экономичных технологий в целом ряде современных промышленных отраслей, включая пищевую промышленность, в частности, для консервного производства пищевой промышленности в числе первостепенных по важности стоит проблема комплексного использования сельскохозяйственного сырья, более полного вовлечения вторичных материальных ресурсов в народное потребление. Рациональное использование побочных продуктов и отходов производства является важнейшим резервом увеличения выработки продукции и повышения эффективности производства в пищевой индустрии.

Проблема сохранения и переработки плодовых косточек, как ценного сырья для целого ряда отраслей промышленности решается их сушкой на плодоовощных предприятиях.

Воздействие теплоты на биологические объекты (пищевые продукты), с целью сохранения их ценных пищевых свойств, стало предметом пристального теоретического и практического изучения в современной науке, базирующаяся на фундаментальных положениях теплофизики и пограничных наук, такие как биохимия, биофизика, микробиология, термодинамика.

## Литературный обзор

Теоретические основы тепло- и массообмена в процессах сушки пищевого растительного сырья и их аппаратное оформление отражены в работах А.В. Лыкова, М.В. Лыкова, П.Д. Лебедева, П.Г. Романкова, А.С. Гинзбурга, А.М. Голдовского, В.В. Белобородова, В.В. Красникова, В.Е. Куцаковой, В.Ф. Фролова, Е.П. Кошевого, Г.К. Филоненко, И.А. Рогова, Б.А. Вороненко и других ученых[1,5].

Однако, несмотря на обилие публикаций, проблемы изучения различного теплового воздействия на пищевые продукты по-прежнему остаются актуальными. Это связано, прежде всего, с тем, что пищевые продукты обладают значительной изменчивостью своих свойств: содержание влаги, химический состав, созревание, время года.

Неоднородность плодовых косточек как объекта сушки - наличие высокобелкового ядра, прочно удерживающего влагу, и косточковой оболочки, легкоотрывающей влагу - требует создания таких условий сушки, при которых будет происходить интенсивное удаление слабо связанной поверхностной влаги из капиллярно-пористой оболочки и перемещение прочно связанной влаги в коллоидном ядре к поверхности косточки. При

испарении влаги с поверхности происходит усадка ядер, а из-за низкой теплопроводности влага не успевает переместиться из глубинных слоев ядра к поверхности. В результате этого косточковая оболочка трескается.

Улучшение показателей процесса сушки плодовых косточек, в частности сокращение расхода энергоресурсов, продолжительности протекания процесса с сохранением качества продукта, осуществлялось путем применения комбинированного способа с использованием инфракрасного нагрева и виброкипящего слоя. При таком способе тепловой обработки достигается интенсивное перемешивание продукта, максимальная поверхность испарения, равномерное импульсное нагревание материала, что позволяет использовать высокие температуры, а также высушивать материал до низкой остаточной влажности (1,7...5%).

Анализ движения продукта в виброкипящем слое при воздействии инфракрасных излучений показывает, что в хаотичном движении материала существует элемент периодичности. Продукт, который перемешивается в данном слое, кратковременно присутствует в зоне облучения успевая нагреться. При этом происходит испарение влаги с его поверхности. Пребывая вне зоны излучения, продукт охлаждается. Температурный градиент изменяет свое направление, совпадая с направлением градиента содержания влаги. В этот период термодиффузия способствует перемещению влаги - интенсифицирует процесс [1-4].

Для выполнения тепловых расчетов при создании установки для сушки плодовых косточек необходимо знание теплофизических характеристик, от которых зависит выбор рационального метода и режима сушки.

В тепловых технологиях наибольший интерес представляет задача определения всего комплекса теплофизических характеристик (ТФХ), а именно: изменение температуропроводности  $\alpha$ , коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , удельной теплоемкости  $c$  и плотности продукта  $\rho$ , при этом необходимо знать не только количественное значение перечисленных величин, но и их функциональную зависимость от температуры и влагосодержания.

Теплофизические характеристики плодовых косточек являются функциями состояния и свойств вещества, зависящих от многих факторов, к которым следует отнести химический состав, начальное влагосодержание, структуру продукта, режимы сушки. При этом большое значение имеет характер изменения ТФХ от основных параметров влажного материала: температуры и влагосодержания.

В научной литературе отсутствуют данные по теплофизическим характеристикам плодовых косточек, поэтому существует необходимость в их определении.

#### **Методы**

Для определения коэффициента теплопроводности плодовых косточек нами использовался зондовый метод и прибор «МИТ-1».

Прибор «МИТ-1» предназначен для оперативного определения теплопроводности и термического сопротивления материалов зондовым методом в соответствии с ДСТУ Б В.2.7-40-95, ГОСТ 30256-94. Диапазон измерений прибора составляет 0,07-4 Вт/(м·К), предел основной ошибки  $\pm 5\%$ , продолжительность измерения 5...6 мин.

На рис. 1 представлен общий вид прибора «МИТ-1» и схема устройства для измерения.

Принцип действия прибора основан на измерении изменения температуры измерительного зонда за определенное время при его нагреве постоянной мощностью.

Прибор состоит из электронного блока, измерительного зонда и внешнего источника питания с выходным напряжением 5В, необходимого для обеспечения достаточной мощности нагревателя в процессе измерений. На лицевой панели корпуса электронного блока расположены клавиатура и окно графического дисплея. В верхней торцевой части корпуса находится разъем для подключения зонда, а также разъем USB для связи с компьютером для обработки результатов и подключения внешнего источника питания. На задней панели в нижней части корпуса находится крышка батарейного отсека. На левой боковой стенке имеется кистевой ремешок.

При определении коэффициента теплопроводности использовался порошок сырых, в процессе сушки и высушенных плодовых косточек, при этом в стеклянный цилиндр помещали исследуемые образцы, вставляли в центр цилиндра зонд диаметром 6,0 мм и максимально уплотняли исследуемый материал. Повторными измерениями устанавливали необходимый диапазон измерений теплопроводности и значения коэффициента теплопроводности в каждом случае.

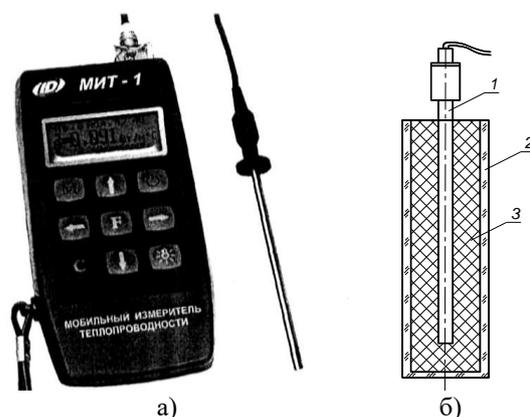


Рис. 1. Общий вид прибора «МИТ-1» (а) и схема устройства для измерения коэффициента теплопроводности (б). Условные обозначения: 1 – зонд; 2 – стеклянный цилиндр емкостью 100 мл; 3 – исследуемый материал

Для определения удельной теплоемкости плодовые косточки рассматривались как продукт, состоящий из следующих составляющих: воды, масла, белков, углеводов и целлюлозы. Каждая  $i$ -тая составляющая имеет свое влияние на общую удельную теплоемкость пропорционально массовой доли  $\omega_i$  в продукте. В результате формула для определения удельной теплоемкости плодовых косточек приняла следующий вид [4-6]:

$$c_{\Pi} = \omega_{\text{В}}c_{\text{В}} + \omega_{\text{М}}c_{\text{М}} + \omega_{\text{Б}}c_{\text{Б}} + \omega_{\text{Угл}}c_{\text{Угл}} + \omega_{\text{Ц}}c_{\text{Ц}} \quad (1)$$

где:  $c_{\text{В}}$  – удельная теплоемкость воды;  $c_{\text{М}}$  – удельная теплоемкость масла;  $c_{\text{Б}}=c_{\text{Угл}}=1,41$  кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость белков и углеводов [5];  $c_{\text{Ц}}=1,33$  кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость целлюлозы [5].

Удельными теплоемкостями воды и масла задавались как функции среднеобъемной температуры продукта. В первом случае использовались табличные данные из источника [5] (для промежуточных значений температуры удельная теплоемкость воды определялась с помощью интерполяции). Во втором случае использовалось следующее уравнение [5]:

$$c_{\text{М}} = \begin{cases} 1,66(0,439 + 0,00185T_{\text{ср}}) & \text{при } 273 < T_{\text{ср}} < 363, \\ 1,66(0,275 + 0,0023T_{\text{ср}}) & \text{при } 363 < T_{\text{ср}} < 423, \end{cases} \quad (2)$$

где  $T_{\text{ср}}$  – абсолютная среднеобъемная температура продукта.

Для определения плотности плодовых косточек использовали пикнометрический метод с постоянной меткой 100 мл (мерная колба).

Пикнометр представляет собой сосуд, изготовленный из стекла, объем которого известен очень точно. Сосуд имеет узкое горло и глухую пробку для уменьшения испарения. Такая конструкция пикнометра позволяет точно заполнить его жидкостью до метки, нанесенной на узком горлышке. Объем жидкости в этом случае и есть обозначенный объем пикнометра.

Пикнометрический метод измерения плотности исследуемого продукта состоит в следующем:

Взвешиваем исследуемый продукт в целом виде массой  $m_{\text{прод}}$ .

Пикнометр заполняем дистиллированной водой (до метки 100 мл), закрываем пробкой и взвешиваем, масса  $m_1$ .

При погружении в пикнометр с водой исследуемого продукта он вытеснит объем воды, равный объему продукта. Удалим вытесненную воду, доведя уровень оставшейся воды до метки пикнометра. Массу пикнометра с водой и опущенным в него твердым телом обозначим  $m_2$ .

Масса вытесненной воды будет равна  $(m_1 + m_{\text{прод}} - m_2)$ , а ее объем, равный объему продукта, будет равен:

$$V_{\text{прод}} = \frac{m_1 + m_{\text{прод}} - m_2}{\rho_0},$$

где  $\rho_0$  – плотность дистиллированной воды, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_0 = \frac{m_{\text{воды}}}{V_{\text{воды}}}$

Искомая плотность исследуемого продукта вычисляется по формуле:

$$\rho_{\text{прод}} = \frac{m_{\text{прод}}}{V_{\text{прод}}} = \frac{m_{\text{прод}}}{m_1 + m_{\text{прод}} - m_2} \cdot \rho_0.$$

Для учета поправки на выталкивающую силу воздуха  $\rho_{\text{возд}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{прод}}}{\rho_0}\right)$ ,

где  $\rho_{\text{возд}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$  - плотность воздуха.

В результате плотность исследуемого продукта исправленная определяется по формуле:

$$\rho_{\text{прод.испр.}} = \frac{m_{\text{прод}}}{V_{\text{прод}}} + \rho_{\text{возд}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{прод}}}{\rho_0}\right). \quad (3)$$

Плотность дистиллированной воды брали исходя из температуры воды (если  $t=20^\circ\text{C}$ , то  $\rho_0 = 0,998 \text{ г/см}^3$ ). Для исключения попадания воды в пористую структуру продукта, перед проведением исследований поверхность косточек покрывалась лаком, плотность которого учитывалась в расчетах. Погрешность измерений составляет  $\pm 3\%$ .

### Результаты

Значения теплофизических характеристик: теплопроводности  $\lambda$ , удельной теплоемкости  $c$ , плотности  $\rho$ , коэффициента температуропроводности  $a$ , плодовых косточек в процессе сушки при различных значениях плотности теплового потока инфракрасного излучения получены согласно, описанным методикам [4,5,14].

По полученным данным в математическом пакете *Mathcad* проведена аппроксимация полиномами с последующим выводом соответствующих уравнений регрессии. Обработка данных осуществлялась при использовании встроенной функции *regress*, которая возвращает коэффициенты полинома степени  $n$ , сглаживающего точки методом наименьших квадратов. В результате получены эмпирические зависимости теплофизических характеристик плодовых косточек в рабочем диапазоне температур и влагосодержаний.

На рис.2 и рис. 3 приведены значения теплофизических характеристик плодовых косточек абрикоса в зависимости от температуры.

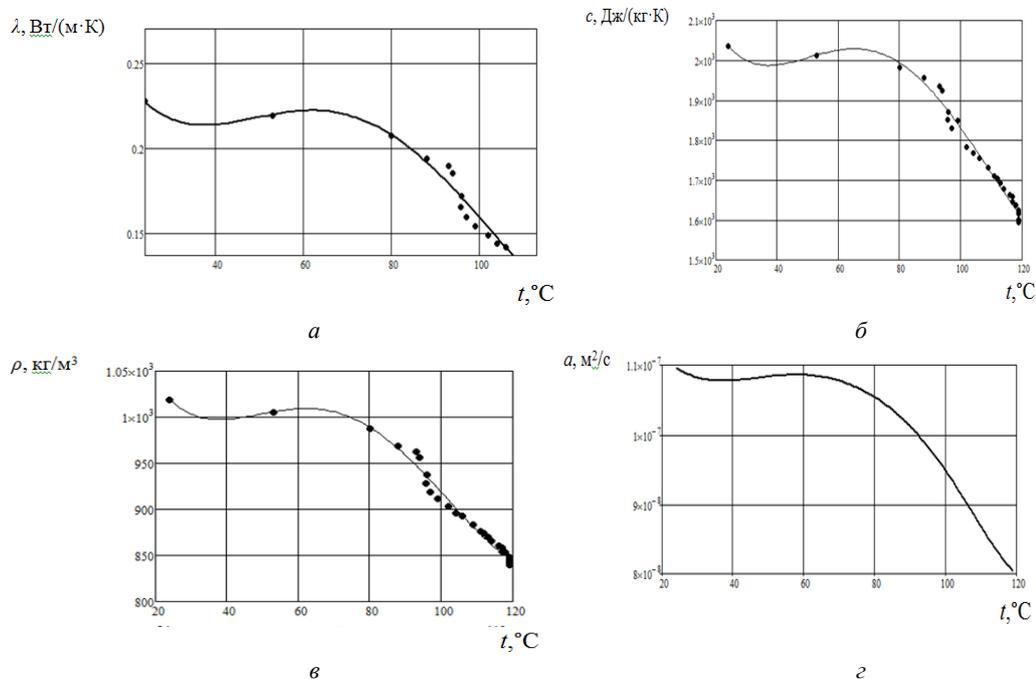


Рис.2. Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек абрикоса при  $q = 900 \text{ Вт/м}^2$

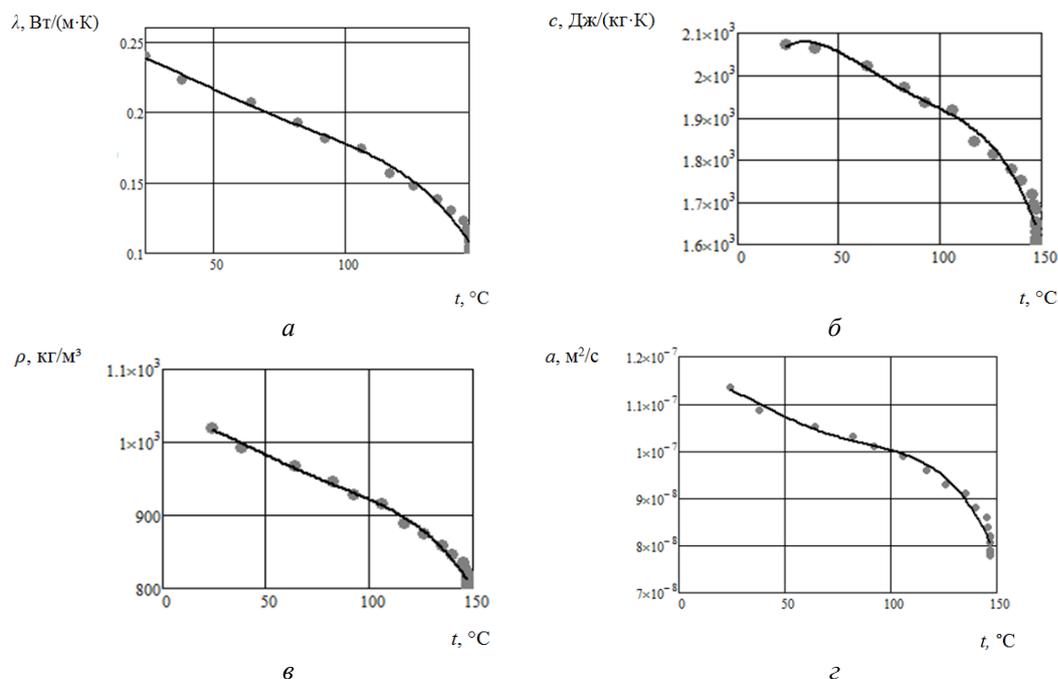


Рис.3. Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек абрикоса при  $q=1400 \text{ Вт/м}^2$

Из рис. 2 и рис. 3 видно, что для всех полученных кривых характерно уменьшение значений ТФХ с повышением температуры нагрева. Наблюдаем при  $q = 900 \text{ Вт/м}^2$  достаточно плавное уменьшение теплофизических характеристик в интервале температур от  $24^\circ\text{C}$  до  $80^\circ\text{C}$  дальнейшее более интенсивное уменьшение до равновесного влагосодержания. При  $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$  характерно более равномерное уменьшение ТФХ в процессе увеличения температуры.

Характер кривых на рис. 2 и рис. 3 показывает, что при повышении плотности теплового потока инфракрасного излучения происходит более равномерное уменьшение ТФХ, также нужно отметить, что начальное влагосодержание косточек абрикоса при  $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$  составило 32,2%, а при  $q = 900 \text{ Вт/м}^2$  - 29,8%.

По мере протекания процесса сушки косточек абрикоса до равновесного влагосодержания происходит уменьшение ТФХ при  $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$ :  $\rho$  – на 21%,  $\lambda$  – 58%,  $c$  – 23%,  $a$  – 31%; при  $q = 400 \text{ Вт/м}^2$ :  $\rho$  – 13%,  $\lambda$  – 43%,  $c$  – 20%,  $a$  – 18%.

Из представленных данных следует, что при повышении плотности теплового потока инфракрасного излучения изменение ТФХ происходит интенсивнее:  $\rho$  – на 8%,  $\lambda$  – 11%,  $c$  – 3%,  $a$  – 3%.

Уравнения регрессии по температурным зависимостям теплофизических характеристик для плодовых косточек абрикоса:

- при плотности теплового потока  $400 \text{ Вт/м}^2$ , диапазона температур  $24...71^\circ\text{C}$ , диапазона влагосодержаний  $28,7...9,2\%$ :

$$\lambda = -1,77 + 0,19 \cdot t - 6,5 \cdot t^2 + 9,4 \cdot t^3 - 4,9 \cdot t^4, R^2 = 0,97;$$

$$c = -8,25 \cdot 10^3 + 997,4 \cdot t - 33,8 \cdot t^2 + 0,49 \cdot t^3 - 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot t^4, R^2 = 0,967;$$

$$\rho = -1,44 \cdot 10^3 + 237,8 \cdot t - 8,1 \cdot t^2 + 0,12 \cdot t^3 - 6,16 \cdot 10^{-4} \cdot t^4, R^2 = 0,972;$$

$$a = -4,46 \cdot 10^{-7} + 5,3 \cdot 10^{-8} \cdot t - 1,8 \cdot 10^{-9} \cdot t^2 + 2,59 \cdot 10^{-11} \cdot t^3 - 1,34 \cdot 10^{-13} \cdot t^4, R^2 = 0,977;$$

где  $R^2$  - величина достоверности аппроксимации;

- при плотности теплового потока  $900 \text{ Вт/м}^2$ , диапазона температур  $24...119^\circ\text{C}$ , диапазона влагосодержаний  $29,8...5,2\%$ :

$$\lambda = 0,4 - 0,013 \cdot t + 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 3,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 1,14 \cdot 10^{-8} \cdot t^4, R^2 = 0,994;$$

$$c = 2,62 \cdot 10^3 - 45,5 \cdot t + 1,1 \cdot t^2 - 0,01 \cdot t^3 + 3,45 \cdot 10^{-5} \cdot t^4, R^2 = 0,988;$$

$$\rho = 1,3 \cdot 10^3 - 20 \cdot t + 0,5 \cdot t^2 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 + 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot t^4, R^2 = 0,994;$$

$$a = 1,6 \cdot 10^{-7} - 4,37 \cdot 10^{-9} \cdot t + 1,1 \cdot 10^{-10} \cdot t^2 - 1,1 \cdot 10^{-12} \cdot t^3 + 3,5 \cdot 10^{-15} \cdot t^4, R^2 = 0,994;$$

- при плотности теплового потока  $1400 \text{ Вт/м}^2$ , диапазона температур  $24...147^\circ\text{C}$ , диапазона влагосодержаний  $32,2...4,3\%$ :

$$\lambda = 0,25 + 4,8 \cdot 10^{-5} \cdot t - 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 2,9 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot t^4, R^2 = 0,993;$$

$$c = 1,9 \cdot 10^3 + 15 \cdot t - 0,4 \cdot t^2 + 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 - 9,8 \cdot 10^{-6} \cdot t^4, R^2 = 0,992;$$

$$\rho = 10^3 + 0,2 \cdot t - 0,1 \cdot t^2 + 4,6 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 1,74 \cdot 10^{-6} \cdot t^4, R^2 = 0,993;$$

$$a = 1,16 \cdot 10^{-7} + 1,1 \cdot 10^{-10} \cdot t - 1,1 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 + 1,23 \cdot 10^{-13} \cdot t^3 + 0,1 \cdot 10^{-15} \cdot t^4, R^2 = 0,993.$$

На рис.4 и 5 приведены значения теплофизических характеристик плодовых косточек черешни в зависимости от температуры.

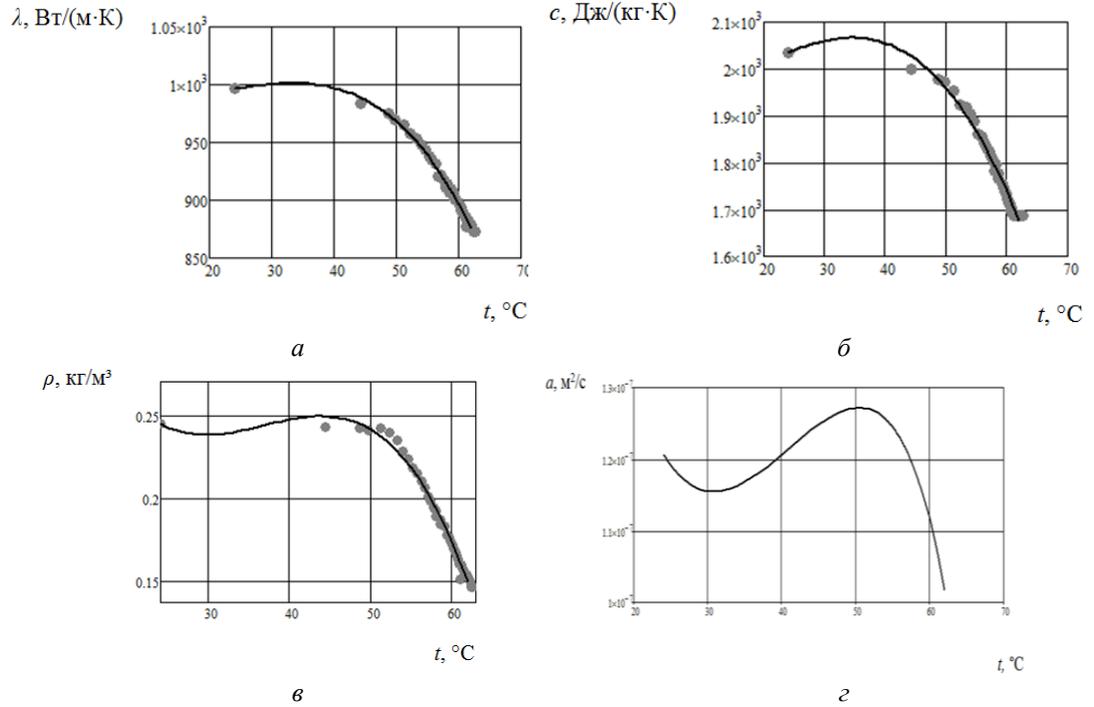


Рис.4. Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек черешни при  $q=400 \text{ Вт/м}^2$

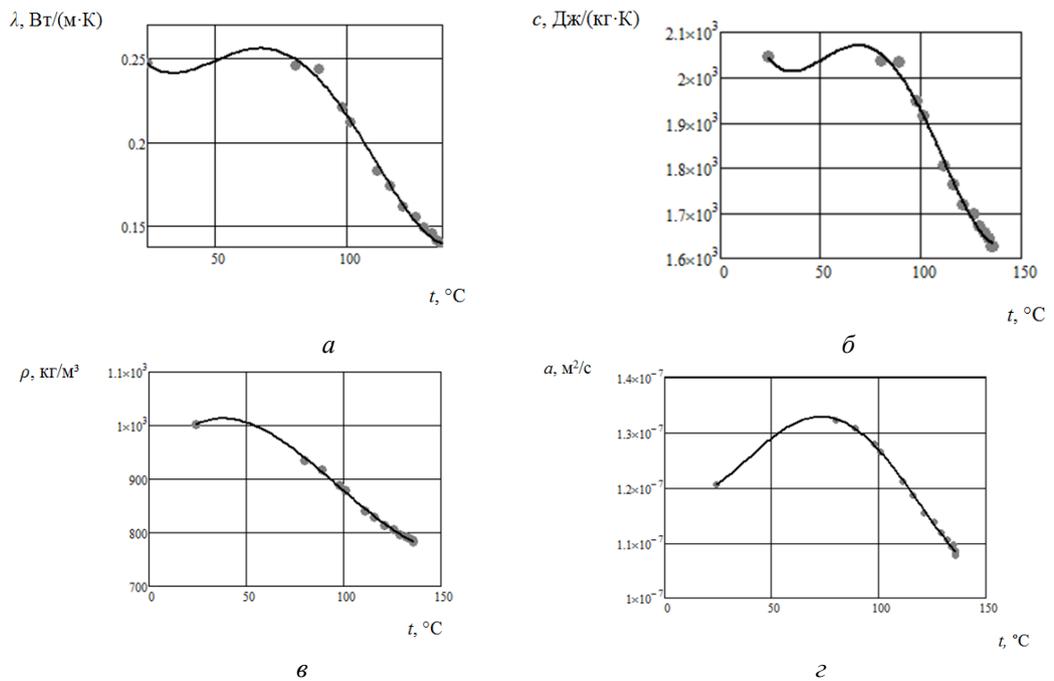


Рис.5. Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек черешни при  $q=1400 \text{ Вт/м}^2$

Их анализ показывает аналогичную тенденцию изменения ТФХ как и для косточек абрикоса. По мере протекания процесса сушки косточек черешни до равновесного влагосодержания происходит уменьшение ТФХ с повышением температуры при  $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$ :  $\rho$  – на 21%,  $\lambda$  – 58%,  $c$  – 24%,  $a$  – 21%; при  $q = 400 \text{ Вт/м}^2$ :  $\rho$  – 12%,  $\lambda$  – 43%,  $c$  – 20%,  $a$  – 18%.

Уравнения регрессии по температурным зависимостям теплофизических характеристик для плодовых косточек черешни:

– при плотности теплового потока  $400 \text{ Вт/м}^2$ , диапазона температур  $24 \dots 113^\circ\text{C}$ , диапазона влагосодержаний  $25,4 \dots 2,4\%$ :

$$\lambda = 0,58 - 0,03 \cdot t + 8,5 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 7,7 \cdot 10^{-6} \cdot t^3, R^2 = 0,995;$$

$$c = 1,88 \cdot 10^3 + 4 \cdot t + 0,2 \cdot t^2 - 5,8 \cdot 10^{-3} \cdot t^3, R^2 = 0,991;$$

$$\rho = 1 \cdot 10^3 - 4 \cdot t + 0,1 \cdot t^2 - 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot t^3, R^2 = 0,998;$$

$$a = 1,7 \cdot 10^{-7} - 5,5 \cdot 10^{-9} \cdot t + 2 \cdot 10^{-10} \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-12} \cdot t^3, R^2 = 0,995;$$

– при плотности теплового потока  $900 \text{ Вт/м}^2$ , диапазона температур  $24 \dots 62^\circ\text{C}$ , диапазона влагосодержаний  $25,5 \dots 6,6\%$ :

$$\lambda = 0,2 + 7 \cdot 10^{-3} \cdot t - 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 4,8 \cdot 10^{-7} \cdot t^3, R^2 = 0,998;$$

$$c = 2 \cdot 10^3 + t - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot t^3, R^2 = 0,997;$$

$$\rho = 827 + 10,9 \cdot t - 0,18 \cdot t^2 + 7 \cdot 10^{-4} \cdot t^3, R^2 = 0,998;$$

$$a = 6 \cdot 10^{-8} + 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot t - 6 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 + 2,6 \cdot 10^{-13} \cdot t^3, R^2 = 0,975;$$

– при плотности теплового потока  $1400 \text{ Вт/м}^2$ , диапазона температур  $24 \dots 136^\circ\text{C}$ , диапазона влагосодержаний  $27,3 \dots 2\%$ :

$$\lambda = 0,35 - 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot t + 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 6,9 \cdot 10^{-9} \cdot t^4, R^2 = 0,998;$$

$$c = 2,5 \cdot 10^3 - 37 \cdot t + 0,9 \cdot t^2 - 8,910^{-3} \cdot t^3 + 2,8 \cdot 10^{-5} \cdot t^4, R^2 = 0,998;$$

$$\rho = 919 + 5,4 \cdot t - 0,1 \cdot t^2 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot t^3, R^2 = 0,999;$$

$$a = 1,2 \cdot 10^{-7} - 4,8 \cdot 10^{-10} \cdot t + 2,4 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 - 2,8 \cdot 10^{-13} \cdot t^3, R^6 = 0,985.$$

### Обсуждение

Возможность проведения аппроксимации полученных кривых изменения ТФХ косточек черешни полиномами 3<sup>й</sup> степени в отличие от косточек абрикоса можно объяснить различным химическим составом, структурой и формой продукта.

Для оценки степени достоверности полученных уравнений регрессии была рассчитана среднеквадратичная ошибка аппроксимации, анализ полученных значений которой показывает, что погрешность расчетов не превышает 3%.

### Выводы

Таким образом, полученные данные могут быть использованы в тепловых расчетах высушиваемых материалов, от которых зависит выбор рационального метода сушки материала. Тепловые характеристики необходимо знать также при обработке результатов экспериментальных исследований процессов тепло - и массообмена, определения механизма переноса тепла во влажном продукте, анализе форм и видов связи влаги с материалом [1, 9-15].

Перспективами дальнейших исследований является изучение закономерностей изменения теплофизических характеристик составляющих плодовых косточек (ядра и оболочки) в процессе сушки.

### Литература

1. Поперечный А.Н., Миронова Н.А. Кинетика сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2015. № 1. С. 142-149.
2. Киптелея Л. В., Загоруйко А.Н. ИК-сушка плодоягодного сырья // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 2. С. 80-86.
3. Поперечный А.Н., Миронова Н.А. Кинетика температурных полей плодовых косточек при инфракрасной сушке в виброкипящем слое // Вестник ДонНТУ: Международный научно-технический журн. 2017. №1(6). С. 43-47.
4. Пономарев С.В. Теоретические и практические основы теплофизических измерений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 408 с. Доступно по URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922109567.html>. Ссылка активна на: 10.12.2019.

5. Гинзбург А.С., Громов М.А. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов. М.: Агропромиздат, 1987. 272 с.
6. Норкулова К.Т., Сафаров Ж.Э. и др. Конвективная сушка и заготовительный процесс лекарственного растительного сырья. Труды 3 международной научно-практической конференции "Векторы развития современной науки". Уфа, 2016. С. 98-100.
7. Рудобашта С.П., Зуева Г.А. и др. Совмещенный процесс сушки и стимуляции семян с помощью импульсного инфракрасного излучения // Актуальные проблемы термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. Первых Международных Лыковских научных чтений, посвященных 105-летию академика А. В. Лыкова. М., 2015. С. 236-240.
8. Завалий А.А., Снежкин Ю.Ф. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолabile материалов. Симферополь, 2016. 264 с.
9. Алтухов И.В., Цугленок Н.В. Технология получения концентрированных сахаросодержащих продуктов с использованием импульсной инфракрасной обработки и сушки корнеклубнеплодов. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018. 155 с.
10. Modern Drying Technology. V.5: Process Intensification / Ed. by Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar F-sted. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2014. 372 p.
11. Poperechnyi A.N., Shdanov I.V., Mironova N.A. Drying of Plant Materials in a Vibro-Fluidized Bed with Infrared Heating // Academic message at the 4th edition of BIOATLAS International Conference, Transilvania University of Brasov, Faculty of Food and Tourism. 2014. May 15-17. pp. 66-70.
12. Van't Land C.M. Drying in the Process Industry. John Wiley & Sons, 2011. 368 p.
13. C.M. Van 't Land. Drying in the Process Industry. F-st Ed. John Wiley & Sons, 2012. 381 p.
14. Поперечный А.Н., Миронова Н.А. и др. Сушка нетрадиционного пищевого и лекарственного сырья. К.: Каштан, 2016. 250 с.
15. Sagar V.R., Suresh Kumar P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables // J Food Sci Technol. 2010. N. 47(1). pp. 15-26.

#### Автор публикации

**Миронова Надежда Александровна** – канд. техн. наук, доцент кафедры оборудования пищевых производств Государственной организации высшего профессионального образования, Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского.

#### References

1. Poperechnyi AN, Mironova NA. Drying kinetics of fruit seeds by infrared radiation in a vibro-boiling layer. *Scientific Journal ITMO*. Russia: St. Petersburg. 2015;1:142-149.
2. Kiptelaya LV, Zagorulko AN. Infrared drying of fruit-bearing raw materials. *Scientific journal NRU ITMO. Series Processes and Food Production Equipment*. 2014;2:80-86.
3. Poperechnyi AN, Mironova NA. Kinetics of temperature fields of fruit seeds during infrared drying in a boiling layer. *Bulletin of Don NTU: International Scientific and Technical Journal*. 2017;1(6):43-47.
4. Ponomareva SV. Theoretical and practical foundations of thermophysical measurements. М.: FIZMATLIT, 2008. 408 p.
5. Ginzburg AS, Gromov MA. Thermophysical characteristics of potatoes, vegetables and fruits. М: Agropromizdat, 1987. 272 p.
6. Norkulova KT, Safarov JE, et al. Convective drying and harvesting of medicinal plant materials. *Proceedings of the 3 th international scientific-practical conference "Vectors of the development of modern science."* Ufa, 2016. S. 98-100.
7. Rudobashta SP, Zuev GA, et al. The combined process of drying and stimulation of seeds by means of pulse infrared radiation. *Urgent problems of thermomoi st processing of materials in various industries and agro-industrial complex : coll. of scient. art. from the first International Lykovsky scientific readings devoted to the 105 anniversary of the academician A. V. Lykov*. 2015. pp. 236-240.
8. Zavaly AA, Snezhkin YuF. *Development and thermal modeling of devices of infrared drying of thermolabile materials*. Simferopol. 2016. 264 p.
9. Altukhov IV, Tsuglenok NV. *The technology for producing concentrated sugar-containing products using pulsed infrared processing and drying root crops*. Irkutsk: Publishing House of the Irkutsk National Research Technical University, 2018. 155 p.
10. Modern Drying Technology. V.5: Process Intensification. Ed. by Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar. F-st ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2014. 372 p.

11. Poperechnyi AN, Shdanov IV, Mironova NA. Drying of Plant Materials in a Vibro-Fluidized Bed with Infrared Heating. *Academic message at the 4th edition of BIOATLAS International Conference, Transilvania University of Brasov, Faculty of Food and Tourism*. 2014. May 15-17, pp. 66-70.
12. Van't Land CM. *Drying in the Process Industry*. John Wiley & Sons, 2011. 368 p.
13. Van't Land CM. *Drying in the Process Industry*. F-st Ed. John Wiley & Sons, 2012. 381 p.
14. Poperechnyi AN, Mironova NA. et al. *Drying of unconventional food and medicinal raw materials*. K: Chestnut, 2016. 250 p.
15. Sagar VR, Suresh Kumar P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables. *Journal Food Sci Technol*. 2010;47(1):15-26.

**Author of the publication**

**Nadezhda A. Mironova** – State Organization of Higher Professional Education «Donetsk national university of economics and trade named after Mykhayilo Tugan-Baranovsky», Donetsk, DPR.

*Поступила в редакцию*

*23 августа 2019г.*