

## Определение теплофизических характеристик тропических фруктов для их использования при производстве сухих молочных продуктов

И. А. Короткий<sup>ID</sup>, Е. Н. Неверов\*<sup>ID</sup>, А. А. Владимиров<sup>ID</sup>,  
О. А. Неверова<sup>ID</sup>, Л. А. Проскурякова<sup>ID</sup>



Кемеровский государственный университет<sup>OR</sup>, Кемерово, Россия

Дата поступления в редакцию: 12.10.2020

Дата принятия в печать: 10.12.2020



© И. А. Короткий, Е. Н. Неверов, А. А. Владимиров, О. А. Неверова, Л. А. Проскурякова, 2021

\*e-mail: [neverov42@mail.ru](mailto:neverov42@mail.ru)

### Аннотация.

**Введение.** При разработке технологий консервирования неизбежно используют теплофизические расчеты процессов переработки сырья. Целью настоящей работы являлся анализ теплофизических характеристик тропических фруктов.

**Объекты и методы исследования.** Тропические фрукты: киви, папайя, авокадо и инжир. Для анализа теплопроводности использовался стационарный метод плоского слоя. Криоскопическая температура определялась по пологой площадке термограммы, полученной в ходе замораживания продукта. Теплоемкость и количество вымороженной влаги определяли расчетным путем на основании известного химического состава продукта. Для определения плотности использовался метод гидростатического взвешивания. Сахаросодержание определялось рефрактометрическим методом. Влагосодержание определялось методом высушивания до постоянной массы.

**Результаты и их обсуждение.** Определены физико-химические показатели киви, авокадо, папайи и инжира. Наибольшее влагосодержание наблюдается у плодов папайи и составляет  $86,32 \pm 0,02$  %, а наибольшая плотность у киви –  $1065 \pm 1$  кг/м<sup>3</sup>. Большое количество сахаров наблюдается у инжира –  $16,0 \pm 0,1$  %. Экспериментальным путем был определен коэффициент теплопроводности тропических фруктов в свежем и в замороженном виде. Установлено, что после замораживания коэффициент теплопроводности продуктов повышается. По сравнению со свежим продуктом у замороженного авокадо незначительно повысился коэффициент теплопроводности, что объясняется его меньшим влагосодержанием. В 3,3 раза повысился коэффициент теплопроводности инжира. Данный продукт обладает самой большой теплопроводностью среди исследуемых плодов как в свежем, так и в замороженном виде –  $0,63 \pm 0,02$  и  $2,06 \pm 0,02$  Вт/(м·К) соответственно. Коэффициент теплопроводности киви и папайи повысился в 2 и 4,2 раза соответственно. Проанализировано влияние наличия пленки и спелости продукта на коэффициент теплопроводности. Обнаружено, что наличие пленки отрицательно сказывается на достоверности анализа теплофизических свойств. Эмпирическим путем определена криоскопическая температура. Расчетно-экспериментальным путем определены остальные теплофизические свойства тропических фруктов, такие как теплоемкость, температуропроводность, а также количество вымороженной влаги.

**Выводы.** Определены физико-химические показатели киви, авокадо, папайи и инжира. Экспериментальным путем был исследован коэффициент теплопроводности тропических фруктов в свежем и в замороженном виде. Полученные значения могут быть использованы в теплотехнических расчетах при разработке новых продуктов, для определения режимов холодильной и тепловой обработки, для разработок технологий обогащения экзотическими фруктами продуктов молочной, хлебопекарной и других отраслей промышленности.

**Ключевые слова.** Папайя, киви, авокадо, инжир, теплопроводность, тепловой поток, замороженная продукция, свежая продукция

**Для цитирования:** Определение теплофизических характеристик тропических фруктов для использования их при производстве сухих молочных продуктов / И. А. Короткий [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 2. С. 220–231. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-220-231>.

Original article

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

## Thermophysical Characteristics of Tropical Fruits in Milk Powder Products

Igor A. Korotkiy<sup>ID</sup>, Evgeny N. Neverov\*<sup>ID</sup>,  
Alexander A. Vladimirov<sup>ID</sup>, Olga A. Neverova<sup>ID</sup>, Larisa A. Proskuryakova<sup>ID</sup>



## Abstract.

**Introduction.** Canning requires thermophysical calculations for thermal or cold processing. These calculations are based on thermophysical characteristics of raw materials. The research objective was to analyze the thermophysical characteristics of tropical fruits.

**Study objects and methods.** The study featured kiwi, papaya, avocado, and figs. Their thermal conductivity was analyzed with the help of stationary fiber plate method. The cryoscopic temperature was determined from the flat area of the thermogram obtained during freezing. The heat capacity and the amount of frozen moisture were determined by calculation based on the available data on the chemical composition of the fruits. The density was defined by using the hydrostatic weighing method, the sugar content – by the refractometric method, the moisture content – by drying to constant mass.

**Results and discussion.** The research revealed the physicochemical parameters of kiwi, avocado, papaya, and figs. Papaya demonstrated the highest moisture content –  $86.32 \pm 0.02\%$ , while kiwi appeared to have the highest density –  $1,065 \pm 1 \text{ kg/m}^3$ . Figs had the highest sugar content –  $16.0 \pm 0.1\%$ . The thermal conductivity coefficient of fresh and frozen tropical fruits was determined experimentally and increased after freezing. Frozen avocado showed only a slight increase in thermal conductivity coefficient because of its low moisture content while frozen figs demonstrated a significant increase in the thermal conductivity coefficient – by 3.3 times. This product possessed the highest thermal conductivity:  $0.63 \pm 0.02 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  for the fresh samples and  $2.06 \pm 0.02 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  for the frozen samples. The thermal conductivity coefficient of kiwi and papaya increased by 2 and 4.2 times, respectively. The experiment also examined the effect of protective plastic wrap and ripeness on the thermal conductivity coefficient. The film proved to have a negative effect on the reliability of thermophysical analysis. The cryoscopic temperature was determined empirically. Such thermophysical properties as heat capacity, thermal diffusivity, and frozen moisture were based on the available chemical composition.

**Conclusion.** The research revealed the physicochemical parameters of kiwi, avocado, papaya, and figs. It included a set of experiments on the thermal conductivity coefficient of fresh and frozen tropical fruits. The obtained values can be used to develop the optimal parameters of thermal processing, refrigeration, and thermal treatment of new products. They can also be useful for fortifying dairy and bakery products with exotic fruits.

**Keywords.** Papaya, kiwi, avocado, figs, thermal conductivity, heat flux, frozen products, fresh products

**For citation:** Korotkiy IA, Neverov EN, Vladimirov AA, Neverova OA, Proskuryakova LA. Thermophysical Characteristics of Tropical Fruits in Milk Powder Products. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):220–231. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-220-231>.

## Введение

Тропические фрукты завоевывают все большую популярность на российском потребительском рынке. Растет ассортимент пищевых продуктов, в которые в качестве ингредиентов включены тропические фрукты.

Важным этапом технологического проектирования производства пищевых продуктов являются теплофизические расчеты процессов переработки пищевого сырья и готового продукта [1, 2]. Для проведения соответствующих расчетов необходимо знать теплофизические характеристики сырьевой базы [3–5]. К основным характеристикам относятся коэффициент теплопроводности и температуропроводности, а также удельная теплоемкость [6–8]. В низкотемпературных процессах переработки, связанных с охлаждением, замораживанием, криоконцентрированием и сублимацией, важными характеристиками являются криоскопические и эвтектические температуры [9].

В отечественной справочной литературе недостаточно информации о теплофизических

показателях ряда продуктов, например, тропических фруктов. В иностранной литературе есть научные работы, связанные с исследованием теплофизических свойств фруктов и продуктов их переработки, но они не охватывают весь спектр данного сырья [10–13]. Тропические фрукты являются биологически ценным сырьем. Они способны не только расширить рацион питания людей, но и могут использоваться как витаминсодержащие добавки при производстве функциональных продуктов [14–21]. Тропические фрукты и овощи широко используются. Например, в качестве добавки в кисломолочные продукты – йогурты, сырки, творожки, в кондитерской промышленности, при добавлении в мороженое и т. д. [22, 23]. Во многих случаях используется тепловая или холодильная обработка. Знания о теплофизических характеристиках необходимы для расчета соответствующих технологических процессов. В литературе отсутствуют сведения об анализе теплофизических характеристик тропических фруктов.

Поэтому определение теплофизических характеристик тропических фруктов является актуальной задачей.

Одна из теплофизических характеристик – коэффициент теплопроводности – должна определяться экспериментально, т. к. данный коэффициент не подчиняется закону аддитивности. Поэтому он не может быть точно определен аналитическим методом. Экспериментальный метод позволяет определить коэффициент теплопроводности того или иного продукта непосредственно из привезенной партии. Это особенно ценно в условиях производства.

Разработка и конструирование установки для определения теплопроводности представляет собой определенные трудности. Готовые решения имеют большую стоимость вследствие сложности их изготовления и дороговизны входящих в состав установки элементов, а также в результате автоматизации таких установок.

Способы получения коэффициента теплопроводности делятся на две группы: стационарные и нестационарные. При стационарном способе достигается такое состояние системы, когда поверхности продукта изотермичны, а тепловой поток постоянен; полученные данные вносятся в формулу и производится расчет. Нестационарные методы требуют более сложного оборудования. Они сложнее в изготовлении, т. к. могут включать в себя электродвигатели, сервоприводы, лазеры, инфракрасные датчики тепла и другие элементы. Главным преимуществом этой группы методов является скорость.

Целью настоящей работы стало определение теплофизических свойств тропических фруктов. Выбор объектов исследования обусловлен тем, что в настоящее время наблюдается рост экспорта тропической плодоовощной продукции. На рынке растут поставки как уже известных российскому покупателю фруктов (манго, авокадо, киви, бананы), так и новых видов (папайя, мангустин, маракуйя и др.). Также появляются новые продукты с тропическими фруктами: соки, сывороточно-соковые продукты, пюре, йогурты, фруктовые консервированные коктейли, мороженое.

Однако базы теплофизических данных по этим продуктам пополняются с задержкой, узнать важные теплофизические характеристики зачастую представляется затруднительным. Особенно это касается российских ресурсов научных работ. В скором времени это может измениться: осваивается выращивание тропических фруктов в субтропических районах нашей страны; увеличивается экспорт тропических фруктов и спрос на них. Растет потребность населения в витаминизированных продуктах и продуктах с функциональным назначением. На основании проведенных в 2011 г.

исследований можно сделать вывод, что тропические фрукты достаточно популярны в нашей стране [24]. По данным социальных опросов, в десятку самых популярных вошли: ананас, киви, кокос, авокадо, банан, манго, фейхоа, папайя, мандарины и апельсины. В порядке убывания популярности их можно расположить так: ананас, банан, киви, авокадо, манго, кокос и мандарин.

Из данных фруктов для применения разработанной установки выбраны киви, авокадо и папайя. Данный выбор обусловлен высокой биологической ценностью, а также их малой изученностью с точки зрения теплофизических свойств [15]. Также для исследований выбран наиболее сахаросодержащий тропический фрукт – инжир. Содержание сахара в нем может превышать 30 %. В данном продукте наблюдается высокая концентрация калия и железа. Кожура инжира, плоды и листья, но в меньшей степени, насыщены фенольными соединениями, которые подавляют окислительный процесс.

Киви богат витаминами, макро- и микроэлементами, содержит много пищевых волокон и умеренно сахаров. Порция размером в полтора плода обеспечивает суточную потребность в витамине С. Особенно большое количество витамина К. Порция фрукта обеспечивает треть суточной потребности организма в витамине К и 1/10 нормы в витамине Е. В киви присутствует большое количество калия, меди, достаточно марганца, фосфора и магния.

Авокадо содержит больше жира, чем любой другой фрукт. В авокадо около 15 % жира, 2 % белков и 2 % углеводов. Также содержит большое количество пищевых волокон: один фрукт способен обеспечить от 45 до 60 % суточной потребности взрослого человека в этом элементе.

В папайе присутствует широкий спектр заменимых и незаменимых аминокислот. Уникальность папайи в том, что в ней содержится много фермента, который называется папаин. Это протеаза, смягчающая мясо. В связи с этим папайю рекомендуется употреблять при необходимости улучшения пищеварения и при проблемах с желудочно-кишечным трактом.

#### **Объекты и методы исследования**

Объектами исследований являлись следующие фрукты: киви, папайя, авокадо и инжир.

Существует ряд факторов, искажающих коэффициент теплопроводности, полученный экспериментальным путем. Некоторые из них зависят от свойств исследуемого вещества, некоторые сопряжены с методом проведения измерений.

Одним из таких факторов является утечки тепла. Эта проблема существует в установках, где количество пройденного через продукт тепла измеряется при помощи двух приборов: амперметра и вольтметра. Несмотря на точность определения теплового потока,

выделяемого используемыми нагревательными элементами, этими приборами, нельзя гарантировать, что весь тепловой поток проходит через исследуемый образец. Иными словами, нельзя точно учесть тепловые потери через щели, неплотности установки и прочие места, где могут произойти теплопотери. Практика показывает, что в электросетях происходит колебание напряжения, которое сказывается на потреблении тока нагревательным элементом. Поэтому тепловой поток приходится принимать за синусоиду неправильной формы и принимать некое усредненное его значение. Таким образом, создание истинно стационарного режима представляется сложным. Решить эту проблему позволяют электронные измерители теплового потока

Следующий отрицательный фактор – тепло, передаваемое от нагревателя установки при помощи излучения. На практике при установлении стационарного режима в установке, хоть и удается добиться минимальных колебаний температур на поверхности продукта, периодическое включение нагревателя создает некую «пульсацию» теплового потока, которая негативно сказывается на точности эксперимента. Для решения этой проблемы можно, во-первых, использовать защитный экран из ткани; во-вторых, уменьшить колебания теплового потока благодаря компенсационному нагревателю, который будет работать в промежутках между включениями основного нагревателя.

Температурный скачок на границе твердого тела и газа относится к измерению теплопроводности газов и не относится к плодоовощной продукции. Проблемой в данном случае является то, что реальный

градиент температуры в слое исследуемого вещества меньше, чем на его изотермических поверхностях, в результате небольшой плотности исследуемого вещества. К телам твердой формы это не относится, т. к. их молекулы плотно прилегают друг к другу и теплопередача проходит лучше.

Для определения теплопроводности использовался известный стационарный метод плоского слоя. Схема установки, в которой реализован данный метод, представлена на рисунке 1. Данная установка была собрана на кафедре теплохладотехники КемГУ.

В качестве нагревательного элемента выступает лампа накаливания мощностью 40 Вт. Продукт устанавливается в отверстие 3. Далее к продукту подключаются термопары 5, датчик теплового потока 4 и плотно закрывается крышка. Включается основной нагреватель 8. Он работает пока температура в измерительной ячейке не достигнет заданного значения. После этого нагреватель 8 отключается и подключается компенсационный нагреватель 2. В качестве компенсационного нагревателя используется гибкий ТЭН мощностью 320 Вт. Он обеспечивает стабильный тепловой поток через продукт и стабильную температуру у его поверхности. Плотность теплового потока регистрируется датчиком 4. В качестве датчика 4 выступает измеритель теплового потока ЦИТ-2 ИТП («УралПромТэк», Россия). Термопары 5 фиксируют температурное поле на поверхностях продукта. Термопары 6 и 7 контролируют температуру нагревающей и охлаждающей прослоек газа у поверхностей исследуемого образца. После установления стационарного режима берутся полученные температуры на поверхностях продукта и тепловой поток через продукт.

Измерительная ячейка в данной установке представлена прямоугольным отверстием в верхней стенке камеры нагревания. Образец, установленный в данное отверстие, соприкасается с внутренним и наружным воздухом. При проведении эксперимента учитываются параметры наружного воздуха. Если нужно провести эксперимент с замороженным продуктом, то вся установка помещается в морозильную камеру. Когда продукт полностью замерзает, то включается контроллер и нагревательный элемент. Когда система приходит к тепловому равновесию, снимаются показания термопар и датчика теплового потока и производятся расчеты. Высота слоя продукта в ячейке может быть различной: от 10 до 30 мм. Оптимальна высота слоя около 20 мм. Для точного измерения теплового потока его датчик плотно прилегает к продукту через слой терморасты.

Коэффициент теплопроводности образца продукта измерялся по следующей формуле:

$$\lambda_c = \frac{Q}{t_{c1} - t_{c2}} \Phi \quad (1)$$

где Q – тепловой поток при стационарном

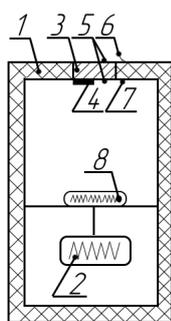


Рисунок 1. Схема установки для измерения теплопроводности: 1 – корпус; 2 – основной нагревательный элемент; 3 – отверстие для установки образца продукта; 4 – датчик теплового потока; 5 – термопары, измеряющие перепад температуры образца; 6, 7 – термопары, измеряющие температуру наружного и внутреннего воздуха; 8 – компенсационный нагреватель

Figure 1. Measuring unit for thermal conductivity: 1 – case; 2 – the main heating set; 3 – hole for product sample; 4 – heat flow sensor; 5 – thermocouples that measure the temperature drop of the sample; 6, 7 – thermocouples that measure outside and inside air temperature; 8 – compensation heater

режиме, Вт;  $\Phi$  – коэффициент формы исследуемого продукта, м<sup>-1</sup>;  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  – температуры на изотермических сторонах образца, °С.

При этом коэффициент формы учитывает геометрическую форму образца и для плоского образца определяется по следующей формуле:

$$\Phi = \frac{\delta_c}{F} \quad (2)$$

где  $\delta_c$  – толщина плоского слоя, м; F – площадь поверхности, к которой приложен тепловой поток, м<sup>2</sup>.

Толщина слоя продукта составляла 20 мм. Фрукты нарезались на специально сооруженных для этого приспособлениях с параллельно расположенными лезвиями. Благодаря этому удавалось сохранить правильные линейные размеры.

Теплопроводность определялась в свежем и замороженном виде. В первом случае температура внутри установки поддерживалась на уровне  $55,0 \pm 0,5$  °С. Во втором случае внутри установки поддерживалась температура в  $10,0 \pm 0,5$  °С. Образец брался с температурой  $-25,0 \pm 0,5$  °С. При большей температуре нагрева образец приближается по температуре к криоскопической точке и начинает таять. Чтобы на охлаждаемой поверхности продукта достичь отрицательной температуры, установку помещали в морозильную камеру.

Теплоемкость определяли расчетным путем по следующей формуле:

$$C = 1,424m_y + 1,549m_b + 1,675m_{ж} + 0,837m_z + 4,187m_g \quad (3)$$

где  $m_y$ ,  $m_b$ ,  $m_{ж}$ ,  $m_z$ ,  $m_g$  – массовые доли углеводов, белков, жиров, золы и влаги соответственно.

В формуле 3 перед массовыми долями стоит коэффициент регрессии.

При расчете теплоемкости замороженных фруктов учитывалась также теплоемкость льда при температуре  $-5$  °С.

Для определения криоскопической температуры продукт очищался от кожицы. Далее в его геометрический центр, на поверхность и в расчетную точку устанавливались термодатчики. В морозильной камере поддерживалась температура от  $-15$  до  $-20$  °С. Данные эксперимента фиксировались каждые 30 сек с последующей компьютерной обработкой и построением графиков.

Коэффициент температуропроводности определяли расчетно-экспериментальным путем по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C} \quad (4)$$

где  $\alpha$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К);  $\rho$  – плотность исследуемого вещества, кг/м<sup>3</sup>; C – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К).

Для определения плотности использовался метод гидростатического взвешивания. Образец взвешивался при помощи электронных весов с точностью 0,001 г. Плотность материала по результатам гидростатического взвешивания рассчитывали по формуле:

$$\rho = \frac{P_1\rho_{ж} - P_2\rho_{в}}{P_1 - P_2} \quad (5)$$

где  $P_1$  – вес образца в воздухе, Н;  $P_2$  – вес образца в жидкости, Н;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{в}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>

Сахаросодержание определялось по ГОСТ 15113.6-77 рефрактометрическим методом.

Влагосодержание устанавливали по ГОСТ 15113.4-77 методом высушивания до постоянной массы.

Количество вымороженной влаги определялось по следующей формуле:

$$\omega = 1 - \frac{t_{кр}}{t} \quad (6)$$

где  $t$ ,  $t_{кр}$  – значения конечной среднеобъемной температуры замороженного продукта и криоскопической температуры, взятые по абсолютной величине, соответственно;  $\omega$  – процент вымороженной влаги (при криоскопической температуре  $\omega = 0$ , при эвтектической –  $\omega = 1$  или 100 %)

Данная характеристика рассчитывалась для продуктов, теплопроводность которых измерялась в замороженном виде. Данные брались из опытов.

### Результаты и их обсуждение

Влагосодержание, плотность и сахаросодержание являются важными характеристиками, влияющими на теплофизические свойства. Влагосодержание – это количество химически не связанной с продуктом воды, т. е. свободной влаги, представленной в виде воды и водных растворов сахаров, солей и других составляющих сока плодовоовощной продукции.

Плотность представляет собой характеристику, отвечающую за расположение молекул продукта и его структуру. Чем больше в продукте воды, тем у него выше плотность. Чем больше газовых включений, тем плотность ниже. Плотность зависит и от органического состава продукта. Чем выше плотность, тем выше теплопроводность и наоборот.

Сахаросодержание – важная характеристика состава продукта, которая влияет на теплопроводность замороженного продукта, потому что сахар образует с водой раствор сахара. Это понижает точку замерзания воды в продукте, содержание вымороженной влаги и теплопроводность.

Данные по исследованию вышеперечисленных характеристик приведены в таблице 1.

Наибольшее влагосодержание ( $86,32 \pm 0,02$  %) наблюдается у плодов папайи, а наибольшая плотность ( $1065 \pm 1$  кг/м<sup>3</sup>) у киви. По количеству сахаров среди всех исследуемых продуктов преобладает инжир.

Таблица 1. Физико-химические характеристики тропических фруктов

Table 1. Physical and chemical characteristics of tropical fruits

Наименование	Влага, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Сахара, %	Сухие вещества, %
Киви	83,87 ± 0,02	1065 ± 1	13,0 ± 0,1	16,13 ± 0,02
Авокадо	77,42 ± 0,02	928 ± 1	–	22,58 ± 0,02
Папайя	86,32 ± 0,02	1049 ± 1	11,5 ± 0,1	13,68 ± 0,02
Инжир	80,65 ± 0,02	754 ± 1	16,0 ± 0,1	19,35 ± 0,02

На рисунке 2 приведена термограмма, полученная при экспериментальном определении коэффициента теплопроводности папайи. На рисунке 3 приведен график изменения плотности теплового потока.

Изменение теплового потока можно разбить на три стадии. На первой стадии в течение первых 15 мин установка выходит на режим. Температура воздуха внутри установки повышается с  $22,0 \pm 0,5$  до  $56,0 \pm 0,5$  °С. На второй стадии происходит снижение плотности теплового потока. Эта стадия объясняется тем, что воздух больше не подогревается, а поверхность продукта продолжает нагреваться. Поэтому разность температур между ними падает и тепловой поток снижается. В дальнейшем температура в камере держится на уровне  $55,0 \pm 0,5$  °С. Стационарный режим (3 стадии) наступил приблизительно через 120 мин. Температура нагреваемой и охлаждаемой поверхности продукта составляла  $39,0 \pm 0,1$  и  $31,0 \pm 0,1$  °С соответственно.

По результатам исследования коэффициент теплопроводности для папайи составил  $0,37 \pm 0,02$  Вт/(м·К), для киви –  $0,56 \pm 0,02$  Вт/(м·К), для

авокадо –  $0,40 \pm 0,02$  Вт/(м·К), для инжира –  $0,63 \pm 0,02$  Вт/(м·К).

Киви представляет особый интерес для исследований теплопроводности. Представленный в данной таблице коэффициент дан для зеленой мякоти киви. Тепловой поток был направлен параллельно волокнам плода. Выявлено, что в плоде температурное поле располагается неравномерно. Коэффициент теплопроводности белой середины плода меньше и составляет  $0,42 \pm 0,02$  Вт/м<sup>2</sup>. А коэффициент теплопроводности при тепловом потоке, направленном перпендикулярно волокнам, составляет  $0,49 \pm 0,02$  Вт/м<sup>2</sup>. Можно сделать вывод, что в результате своей структуры киви не подчиняется закону аддитивности.

Коэффициент теплопроводности папайи в свежем виде близок к коэффициенту теплопроводности яблока. Это обусловлено ее структурой, которая схожа со структурой яблока. Структура киви может содержать относительно большое количество газовых включений, значительно снижающие теплопроводность.

Относительно низкая теплопроводность авокадо объясняется его структурой, что вызвано относительно низким содержанием влаги и большим содержанием жиров.

У инжира теплопроводность выше, чем у воды. Это обусловлено тем, что в воде, содержащейся в инжире, много растворенных сахаров. Кроме того

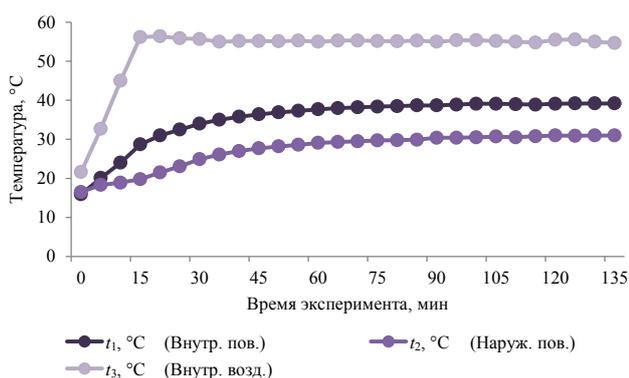


Рисунок 2. Термограмма процесса определения коэффициента теплопроводности папайи:

t<sub>1</sub> – температура нагреваемой поверхности образца;  
t<sub>2</sub> – температура охлаждаемой поверхности образца;  
t<sub>3</sub> – температура воздуха внутри установки

Figure 2. Thermogram of the thermal conductivity coefficient of papaya: t<sub>1</sub> – temperature of heated surface; t<sub>2</sub> – temperature of cooled surface; t<sub>3</sub> – inside air temperature

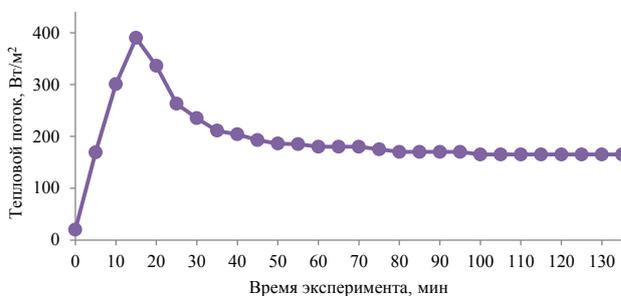


Рисунок 3. График плотности теплового потока при определении коэффициента теплопроводности папайи

Figure 3. Thermal conductivity coefficient of papaya: heat flux density

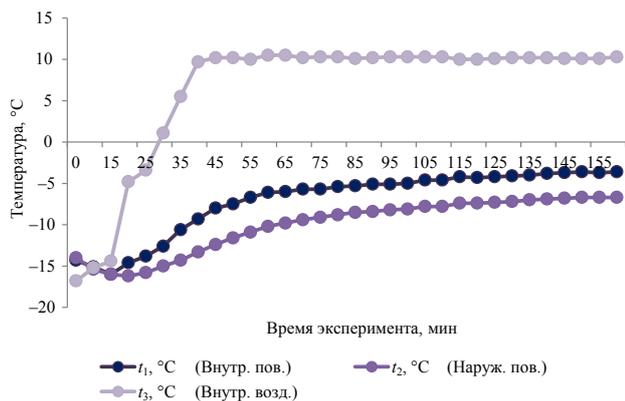


Рисунок 4. Термограмма процесса определения коэффициента теплопроводности замороженного киви:  $t_1$  – температура нагреваемой поверхности образца;  $t_2$  – температура охлаждаемой поверхности образца;  $t_3$  – температура воздуха внутри установки

Figure 4. Thermogram of the thermal conductivity coefficient of frozen kiwi:  $t_1$  – temperature of heated surface;  $t_2$  – temperature of cooled surface;  $t_3$  – inside air temperature

структура инжира содержит относительно мало газовых включений.

Далее проводили аналогичные исследования для замороженных продуктов.

Термограмма процесса при исследовании замороженных плодов отличается от термограммы обработки свежих. На рисунке 4 приведена термограмма измерения коэффициента теплопроводности замороженного киви.

Вначале наблюдается снижение температур на внутренней и наружной поверхности продукта. Объясняется это тем, что тепловой поток через продукт вначале отсутствует или он незначителен. При этом съём энергии с охлаждаемой поверхности образца происходит интенсивно. Особенно это заметно на кривой наружной поверхности образца.

Далее наблюдается рост разницы температур между поверхностями, т. е. увеличивается градиент внутри образца. Это можно объяснить эффектом «скачка» температур на разделении сред продукт – воздух. После стадии скачка температуры на поверхности можно наблюдать стадию регулярного режима. При этом градиент температуры в продукте неизменен, а повышение температур происходит с одинаковой скоростью.

Стационарный режим наступает приблизительно со 150-й минуты. Температуры в образце образуют неизменный во времени градиент и две изотермические поверхности. Перепад температур в замороженном продукте меньше, чем при эксперименте со свежим продуктом. Это объясняется большей теплопроводностью замороженного продукта из-за перехода воды в лед.

Таблица 2. Результаты исследования коэффициента теплопроводности замороженных тропических фруктов при температуре  $-5,0 \pm 0,5$  °C

Table 2. Thermal conductivity coefficient of frozen tropical fruits at  $t = -5.0 \pm 0.5$  °C

Наименование	Коэффициент теплопроводности Вт/(м·К)
Киви	$1,13 \pm 0,02$
Папайя	$1,65 \pm 0,02$
Авокадо	$0,97 \pm 0,02$
Инжир	$2,06 \pm 0,02$

Коэффициенты теплопроводности остальных исследованных замороженных тропических фруктов приведены в таблице 2.

По сравнению со свежим продуктом у замороженного авокадо незначительно повысился коэффициент теплопроводности, что, согласно литературным данным, объясняется его меньшим влагосодержанием. В 3,3 раза повысился коэффициент теплопроводности инжира. Инжир обладает самой большой теплопроводностью среди исследуемых плодов как в свежем, так и в замороженном виде –  $0,63 \pm 0,02$  и  $2,06 \pm 0,02$  Вт/(м·К) соответственно. Коэффициент теплопроводности киви повысился лишь в 2 раза. Это обусловлено низкой температурой заморозки и меньшим количеством вымороженной влаги. Коэффициент теплопроводности папайи повысился значительно – в 4,2 раза.

С потерей влаги (усушкой) продукты изменяют свои теплофизические характеристики. Вероятность усушки в течение двух или трех часового эксперимента достаточно высока. Возможным способом предотвращения усушки является использование пищевой пленки. Для проверки данного факта были проведены соответствующие эксперименты. Для проведения использовалась тонкая пищевая пленка толщиной 8 микрон. Материал – полиэтилен. Было проведено два эксперимента с киви: один – контрольный, а второй – с использованием пленки. Результаты сведены в таблицу 3.

Длительность экспериментов была одинаковой, толщина образцов тоже. Если бы предположение о положительном влиянии пленки на эксперимент было верно, то наблюдался бы меньший градиент температуры в продукте и больший тепловой поток. Однако по результатам эксперимента тепловой поток уменьшился почти в 2 раза.

Коэффициент теплопроводности у образца с пленкой существенно отличается от такого у образца без пленки. Полученный коэффициент теплопроводности близок к груше, яблоку и айве в результате пористости и газовой составляющей в их структуре, а также их меньшей плотности и

Таблица 3. Результаты исследования влияния пленки на определение теплопроводности

Table 3. Effect of plastic wrap on thermal conductivity measurements

Параметры проведения эксперимента	Эксперимент	
	Контрольный	С пленкой
Длительность, мин	160	160
Высота слоя, м	$0,0194 \pm 0,0001$	$0,0194 \pm 0,0001$
Температура нагрева, °С	$55,3 \pm 0,1$	$50,2 \pm 0,1$
Температура охлаждения, °С	$27,3 \pm 0,1$	$25,0 \pm 0,1$
$\Delta T$ нагрева и охлаждения, °С	$28,0 \pm 0,2$	$25,2 \pm 0,2$
Конечная температура нагретой поверхности, °С	$39,8 \pm 0,1$	$41,6 \pm 0,1$
Конечная температура охлажденной поверхности, °С	$33,9 \pm 0,1$	$36,3 \pm 0,1$
$\Delta T$ изотермических поверхностей, °С	$5,8 \pm 0,2$	$5,3 \pm 0,2$
Установившийся тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>	$175 \pm 10$	$100 \pm 7$
Полученный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	$0,56 \pm 0,02$	$0,37 \pm 0,02$

водянистости. Киви достаточно плотный фрукт, который содержит много влаги и не содержит газовых включений.

Таким образом, предположение не оправдалось: пленка хоть и уменьшает усушку, но из-за дополнительного термического сопротивления создает эффект «термоса» и не дает теплу свободно проходить через продукт, задерживая тепловой поток. Это негативно влияет на экспериментальное определение коэффициента теплопроводности.

В рамках исследования были также проведены эксперименты по анализу влияния степени зрелости плодов на теплофизические свойства. Для этого использовались два плода папайи разной степени спелости. Один закупался осенью (в октябре), а второй – летом (в июне). Первый плод был с зеленой шкуркой, безвкусный, со светлой мякотью. Второй – с желтой шкуркой, выраженным ароматом и вкусом, более мягкий и водянистый. Результаты эксперимента приведены в таблице 4. Результаты свидетельствуют о том, что спелость плодов оказывает влияние на коэффициент теплопроводности: в спелом плоде он оказался на  $0,02$  Вт/(м·К) выше, чем в неспелом.

Были также исследованы такие характеристики, как теплоемкость, криоскопическая температура, температуропроводность и количество вымороженной влаги.

Теплоемкость рассчитывалась по данным химического состава из справочной литературы. Полученные значения теплопроводности по формуле (3) занесены в таблицу 5. Расчет теплоемкости происходил для плодов в свежем виде. Результаты определения остальных теплофизических характеристик также сведены в таблицу 5.

Наибольшая теплоемкость наблюдается у папайи, что объясняется наибольшим влагосодержанием. Наибольшая температура замерзания – у инжира,

что объясняется большим содержанием сахаров в его составе. По количеству вымороженной влаги на первом месте – авокадо, что объясняется сниженным общим содержанием влаги и повышенным содержанием жиров.

#### Выводы

В результате проведенной работы определены физико-химические показатели киви, авокадо, папайи и инжира. Экспериментальным путем был исследован коэффициент теплопроводности тропических фруктов в свежем и в замороженном виде. По результатам исследования коэффициент теплопроводности свежих фруктов составил: для папайи –  $0,37 \pm 0,02$  Вт/(м·К), для киви –  $0,56 \pm 0,02$  Вт/(м·К), для авокадо –  $0,4 \pm 0,02$  Вт/(м·К), для инжира –  $0,63 \pm 0,02$  Вт/(м·К). По сравнению со свежим продуктом у замороженного авокадо незначительно повысился коэффициент теплопроводности, что объясняется его меньшим влагосодержанием. В 3,3 раза повысился коэффициент теплопроводности инжира. Данный продукт обладает самой большой теплопроводностью среди исследуемых плодов как в свежем, так и в замороженном виде ( $0,63 \pm 0,02$  и  $2,06 \pm 0,02$  Вт/(м·К) соответственно). Коэффициент теплопроводности киви и папайи повысился в 2 и 4,2 раза соответственно.

Полученные значения могут быть использованы в теплотехнических расчетах при разработке новых продуктов, для определения режимов холодильной и тепловой их обработки, для разработок технологий обогащения экзотическими фруктами продуктов молочной, хлебопекарной и других отраслей промышленности, т. к. при разработке данных технологий понадобятся как теплофизические, так и физические характеристики, полученные в ходе работы.

Таблица 4. Результаты повторного эксперимента с более спелой папайей в свежем виде

Table 4. Repeated experiment on a riper fresh papaya sample

Параметры проведения эксперимента	Эксперимент	
	Спелая	Не спелая
Длительность, мин	150	135
Высота слоя, м	0,0202 ± 0,0001	0,0193 ± 0,0001
Температура нагрева, °С	55,2 ± 0,1	55,2 ± 0,1
Температура охлаждения, °С	32,5 ± 0,1	24,5 ± 0,1
ΔТ нагрева и охлаждения, °С	22,7 ± 0,2	30,7 ± 0,2
Конечная температура нагретой поверхности, °С	44,0 ± 0,1	39,2 ± 0,1
Конечная температура охлажденной поверхности, °С	36,3 ± 0,1	31,0 ± 0,1
ΔТ изотермических поверхностей, °С	7,7 ± 0,2	8,2 ± 0,2
Установившийся тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>	141 ± 10	165 ± 11
Полученный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,37 ± 0,02	0,39 ± 0,02

Таблица 5. Значения некоторых теплофизических характеристик для тропических фруктов

Table 5. Thermophysical parameters of tropical fruits

Наименование	Теплоемкость С, кДж/(кг·К)		$t_{кр}$ , °С	Температуропроводность, м <sup>2</sup> /с		Кол-во вымороженной влаги, %
	Свежий	Замороженный		Свежий	Замороженный	
Киви	3,64 ± 0,02	2,46 ± 0,02	-1,8 ± 0,1	14,6×10 <sup>-5</sup>	(41,2 ± 0,3)×10 <sup>-5</sup>	65,05 ± 0,02
Авокадо	3,34 ± 0,02	2,13 ± 0,02	-1,1 ± 0,1	12,9×10 <sup>-5</sup>	(48,9 ± 0,3)×10 <sup>-5</sup>	78,43 ± 0,02
Папайя	3,83 ± 0,02	2,67 ± 0,02	-2,7 ± 0,1	9,2×10 <sup>-5</sup>	(58,7 ± 0,3)×10 <sup>-5</sup>	60,29 ± 0,02
Инжир	3,56 ± 0,02	2,57 ± 0,02	-2,9 ± 0,1	23,3×10 <sup>-5</sup>	(100,6 ± 0,3)×10 <sup>-5</sup>	57,66 ± 0,02

Проведенные испытания лабораторной установки позволили выявить возможные пути ее модернизации:

- установка выравнителя напряжения сети, что позволит компенсационному нагревателю работать без колебаний мощности и будет способствовать установлению еще более стабильного стационарного потока, а также потребуются меньше ручных манипуляций по управлению мощностью нагревателя;
- добавление еще одного отверстия для закладки продукта, что позволит выполнять два эксперимента сразу. Теоретически можно довести количество отверстий до трех. Главное – организовать подключение термопар и нормальное снятие данных с приборов во время эксперимента;
- организация автоматической фиксации показаний термопар на компьютере, что уменьшит объем ручной работы во время протоколирования данных эксперимента;
- добавление отверстия для измельченного продукта. Дно такого отверстия должно быть из ровной металлической пластины. Необходимо также организовать герметичность и возможность очистки отверстия;
- добавление в систему элементов Пельтье, подключенных через трансформатор и регулятор напряжения, снабженных вентиляторами. Это позволит обходиться без морозильного ларя, но усложнит эксплуатацию и саму конструкцию установки;

– разработать методику исследования теплоемкости благодаря данной установке, что позволит за один эксперимент опытным путем получать не только значение коэффициента теплопроводности, но и теплоемкость продукта;

К недостаткам метода и установки, описанных в работе, относятся:

- большая длительность эксперимента (от 2-х до 4-х часов вместе с подготовкой установки и выходом на режим), т. к. стационарный режим не относится к скоростным методам определения теплопроводности;
- сложность проведения экспериментов с продуктами мягкой консистенции, таких как инжир.

Разработанная установка может быть успешно использована для:

- исследования теплопроводности теплоизоляционных материалов, древесины, резины и материалов из каучука и пластмасс;
- исследования теплопроводности кашеобразных продуктов (при условии небольшой модернизации): измельченных ягод, таких как облепиха, клюква, смородина и др.;
- исследования теплопроводности продуктов животноводства, а также грибов.

#### Критерии авторства

И. А. Короткий руководил научной работой.

Е. Н. Неверов и А. А. Владимиров сконструировала экспериментальную установку и проводил эксперименты. О. А. Неверова описывала результаты исследований. Л. А. Проскурякова участвовал в обработке опытных данных.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Contribution

I.A. Korotkiy supervised the research work. E.N. Neverov and A.A. Vladimirov designed an experimental setup and performed the experiment. O.A. Neverova described the research results. L.A. Proskuryakova processed the obtained data.

#### Conflict of interest

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

#### Список литературы

1. Zabalaga R. F., La Fuente C. I. A., Tadini C. C. Experimental determination of thermophysical properties of unripe banana slices (*Musa cavendishii*) during convective drying // Journal of Food Engineering. 2016. Vol. 187. P. 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.020>.
2. Inverse method for the simultaneous estimation of the thermophysical properties of foods at freezing temperatures / I. Cornejo [et al.] // Journal of Food Engineering. 2016. Vol. 191. P. 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.07.003>.
3. Попов А. М., Plotnikov K. B., Donya D. V. Determination of dependence between thermophysical properties and structural-and-phase characteristics of moist materials // Foods and Raw Materials. 2017. Vol. 5. № 1. P. 137–143. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-137-143>.
4. Study of influence of freezing-defrosting on thermophysical properties of meat systems / M. Yancheva [et al.] // Eureka: Life Sciences. 2018. № 1. P. 32–38. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2018.00537>.
5. Composition and thermophysical properties of Malay Rose apple pulp / R. C. I. Fontan [et al.] // International Food Research Journal. 2018. Vol. 25. № 3. P. 1067–1073.
6. Paluri S., Phinney D. M., Heldman D. R. Recent advances in thermophysical properties – measurements, prediction, and importance // Current Opinion in Food Science. 2018. Vol. 23. P. 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.10.005>.
7. Zielinska M., Ropelewska E., Markowski M. Thermophysical properties of raw, hot-air and microwave-vacuum dried cranberry fruits (*Vaccinium macrocarpon*) // LWT – Food Science and Technology. 2017. Vol. 85. P. 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.016>.
8. On the relevance of thermophysical characterization in the microwave treatment of legumes / A. Dalmoro [et al.] // Food and Function. 2018. Vol. 9. № 3. P. 1816–1828. <https://doi.org/10.1039/c7fo01488k>.
9. Филиппов В. И., Степанов А. В. Рациональная точность определения теплофизических характеристик пищевых продуктов в расчетах технологических параметров холодильной обработки // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2015. № 2. С. 125–132.
10. Thermophysical properties of papaya puree / A. Tansakul [et al.] // International Journal of Food Properties. 2012. Vol. 15. № 5. P. 1086–1100. <https://doi.org/10.1080/10942912.2010.513467>.
11. Manjunatha S. S., Raju P. S., Bawa A. S. Thermophysical properties of enzyme clarified Lime (*Citrus aurantifolia* L) juice at different moisture contents // Journal of Food Science and Technology. 2014. Vol. 51. № 11. P. 3038–3049. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0866-x>.
12. Mukama M., Ambaw A., Opara U. L. Thermophysical properties of fruit – a review with reference to postharvest handling // Journal of Food Measurement and Characterization. 2020. Vol. 14. № 5. P. 2917–2937. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00536-8>.
13. Zabalaga R. F., La Fuente C. I. A., Tadini C. C. Experimental determination of thermophysical properties of unripe banana slices (*Musa cavendishii*) during convective drying // Journal of Food Engineering. 2016. Vol. 187. P. 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.020>.
14. The antioxidant properties of exotic fruit juices from acai, maqui berry and noni berries / D. Nowak [et al.] // European Food Research and Technology. 2018. Vol. 244. № 11. P. 1897–1905. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3102-8>.
15. Exploring the chemical composition, emerging applications, potential uses, and health benefits of durian: A review / M. Mohd Ali [et al.] // Food Control. 2020. Vol. 113. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107189>.
16. De Mendonça V. Z., Vieites R. L. Physical-chemical properties of exotic and native Brazilian fruits // Acta Agronomica. 2019. Vol. 68. № 3. <https://doi.org/10.15446/acag.v68n3.55934>.
17. Avocado: characteristics, health benefits and uses / P. F. Duarte [et al.] // Ciencia Rural. 2016. Vol. 46. № 4. P. 747–754. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141516>.
18. Ragone D. Breadfruit for food and nutrition security in the 21st century // Tropical Agriculture. 2016. Vol. 93. № 1. P. 18–29.

19. Ganeshan G., Shadangi K. P., Mohanty K. Thermo-chemical conversion of mango seed kernel and shell to value added products // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2016. Vol. 121. P. 403–408. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.09.004>.
20. Amini Khoozani A., Birch J., Bekhit A. E.-D. A. Production, application and health effects of banana pulp and peel flour in the food industry // Journal of Food Science and Technology. 2019. Vol. 56. № 2. P. 548–559. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-03562-z>.
21. Development of a mixed jussara and mango juice with added *Lactobacillus rhamnosus* GG submitted to sub-lethal acid and baric stresses / F. C. Prates [et al.] // Journal of Food Science and Technology. 2020. Vol. 57. № 12. P. 4524–4532. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04491-6>.
22. Development of functional ice cream added exotic fruit / M. E. A. Lima [et al.] // Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos. 2017. Vol. 35. № 1. <https://doi.org/10.5380/cep.v35i1.55940>.
23. Effect of nanoencapsulation using PLGA on antioxidant and antimicrobial activities of guabiroba fruit phenolic extract / M. C. Pereira [et al.] // Food Chemistry. 2018. Vol. 240. P. 396–404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.144>.
24. Дубцов Г. Г., Лазар Я. Б. Тропические плоды на российском рынке // Пищевая промышленность. 2011. № 3. С. 54–57.

### References

1. Zabalaga RF, La Fuente CIA, Tadini CC. Experimental determination of thermophysical properties of unripe banana slices (*Musa cavendishii*) during convective drying. Journal of Food Engineering. 2016;187:62–69. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.020>.
2. Cornejo I, Cornejo G, Ramírez C, Almonacid S, Simpson R. Inverse method for the simultaneous estimation of the thermophysical properties of foods at freezing temperatures. Journal of Food Engineering. 2016;191:37–47. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.07.003>.
3. Popov AM, Plotnikov KB, Donya DV. Determination of dependence between thermophysical properties and structural-and-phase characteristics of moist materials. Foods and Raw Materials. 2017;5(1):137–143. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-137-143>.
4. Yancheva M, Dromenko O, Potapov V, Grinchenko O, Zhelieva T. Study of influence of freezing-defrosting on thermophysical properties of meat systems. Eureka: Life Sciences. 2018;(1):32–38. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2018.00537>.
5. Fontan RCI, Sampaio VS, Souza EC Jr, Pereira RG, Rodrigues LB, Gonçalves GRF, et al. Composition and thermophysical properties of Malay Rose apple pulp. International Food Research Journal. 2018;25(3):1067–1073.
6. Paluri S, Phinney DM, Heldman DR. Recent advances in thermophysical properties – measurements, prediction, and importance. Current Opinion in Food Science. 2018;23:142–148. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.10.005>.
7. Zielinska M, Ropelewska E, Markowski M. Thermophysical properties of raw, hot-air and microwave-vacuum dried cranberry fruits (*Vaccinium macrocarpon*). LWT – Food Science and Technology. 2017;85:204–211. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.016>.
8. Dalmoro A, Naddeo C, Caputo S, Lamberti G, Guadagno L, D’Amore M, et al. On the relevance of thermophysical characterization in the microwave treatment of legumes. Food and Function. 2018;9(3):1816–1828. <https://doi.org/10.1039/c7fo01488k>.
9. Filippov VI, Stepanov AV. Rational determination accuracy of the foodstuffs thermal and physical characteristics in the calculation of cold treatment. Scientific Journal NRU ITMO. Processes and Food Production Equipment. 2015;(2):125–132. (In Russ.).
10. Tansakul A, Kantrong H, Saengrayup R, Sura P. Thermophysical properties of papaya puree. International Journal of Food Properties. 2012;15(5):1086–1100. <https://doi.org/10.1080/10942912.2010.513467>.
11. Manjunatha SS, Raju PS, Bawa AS. Thermophysical properties of enzyme clarified Lime (*Citrus aurantifolia* L) juice at different moisture contents. Journal of Food Science and Technology. 2014;51(11):3038–3049. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0866-x>.
12. Mukama M, Ambaw A, Opara UL. Thermophysical properties of fruit – a review with reference to postharvest handling. Journal of Food Measurement and Characterization. 2020;14(5):2917–2937. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00536-8>.
13. Zabalaga RF, La Fuente CIA, Tadini CC. Experimental determination of thermophysical properties of unripe banana slices (*Musa cavendishii*) during convective drying. Journal of Food Engineering. 2016;187:62–69. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.020>.
14. Nowak D, Gośliński M, Przygoński K, Wojtowicz E. The antioxidant properties of exotic fruit juices from acai, maqui berry and noni berries. European Food Research and Technology. 2018;244(11):1897–1905. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3102-8>.
15. Mohd Ali M, Hashim N, Aziz SA, Lasekan O. Exploring the chemical composition, emerging applications, potential uses, and health benefits of durian: A review. Food Control. 2020;113. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107189>.

16. De Mendonça VZ, Vieites RL. Physical-chemical properties of exotic and native Brazilian fruits. *Acta Agronomica*. 2019;68(3). <https://doi.org/10.15446/acag.v68n3.55934>.
17. Duarte PF, Chaves MA, Borges CD, Mendonça CRB. Avocado: characteristics, health benefits and uses. *Ciencia Rural*. 2016;46(4):747–754. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141516>.
18. Ragone D. Breadfruit for food and nutrition security in the 21st century. *Tropical Agriculture*. 2016;93(1):18–29.
19. Ganeshan G, Shadangi KP, Mohanty K. Thermo-chemical conversion of mango seed kernel and shell to value added products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016;121:403–408. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.09.004>.
20. Amini Khoozani A, Birch J, Bekhit AE-DA. Production, application and health effects of banana pulp and peel flour in the food industry. *Journal of Food Science and Technology*. 2019;56(2):548–559. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-03562-z>.
21. Prates FC, de Castro Leite Júnior BR, Martins EMF, Cristianini M, da Silva RR, da Rocha Campos AN, et al. Development of a mixed jussara and mango juice with added *Lactobacillus rhamnosus* GG submitted to sub-lethal acid and baric stresses. *Journal of Food Science and Technology*. 2020;57(12):4524–4532. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04491-6>.
22. Lima MEA, Thiers TR, Quintão AO, Ferreira FS, Da Cunha LR, Da Cunha SFV, et al. Development of functional ice cream added exotic fruit. *Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*. 2017;35(1). <https://doi.org/10.5380/cep.v35i1.55940>.
23. Pereira MC, Oliveira DA, Hill LE, Zambiasi RC, Borges CD, Vizzotto M, et al. Effect of nanoencapsulation using PLGA on antioxidant and antimicrobial activities of guabiroba fruit phenolic extract. *Food Chemistry*. 2018;240:396–404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.144>.
24. Dubtsov GG, Lazar YB. Tropical fruits on the Russian market. *Food Industry*. 2011;(3):54–57. (In Russ.).