УДК 664.8.037.5

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯГОД ОБЛЕПИХИ ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ

И.А. Короткий[1], Е.В. Короткая[1,*], В.В. Киреев[2]

[1]ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

[2]ООО «Тулунский мясной двор», 665268, Россия, г. Тулун, ул. Мясокомбинатская, 31

**e-mail: lena_short@mail.ru*

Дата поступления в редакцию: 08.02.2016
Дата принятия в печать: 15.04.2016

Ягоды облепихи играют важную роль в пищевом рационе жителей Сибири. Они являются богатейшим источником витаминов С и Е, содержат значительное количество каротиноидов, различные витамины группы В, F и Р, минеральные вещества, а также способствуют поддержанию здоровья и долголетия. Одним из наиболее эффективных методов консервирования плодов и ягод является замораживание. Для разработки эффективных и энергосберегающих технологий низкотемпературного консервирования и хранения плодово-ягодного сырья, в частности ягод облепихи, необходима достоверная и объективная информация об их теплофизических свойствах во всем диапазоне температурного воздействия. К тому же знание теплофизических характеристик необходимо при проектировании и подборе технологического оборудования для осуществления процессов замораживания. Данная работа посвящена исследованиям теплофизических характеристик ягод облепихи различных сортов в свежем и замороженном состоянии. Для определения теплофизических характеристик был выбран первый буферный метод двух температурно-временных интервалов. В статье изложена методика проведения эксперимента и методика обработки экспериментальных данных для определения теплофизических характеристик ягод облепихи при температурах выше криоскопической точки и после окончания процесса замораживания. Приведены измеренные значения теплофизических характеристик пяти сортов ягод облепихи в свежем и замороженном состоянии. Установлено, что значения теплофизических характеристик ягод в наибольшей степени определяются массовой долей содержащейся в них влаги. Колебания в значениях теплофизических характеристик для ягод различных сортов облепихи весьма незначительны, поэтому для теплотехнических расчетов технологических процессов, связанных с температурным воздействием, следует использовать средние значения теплофизических характеристик.

Теплофизические характеристики, ягоды облепихи, теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость

Введение

Потребность организма современного человека в необходимом количестве витаминов и минеральных веществ существенно возросла вследствие роста стрессовых и экологически неблагоприятных факторов. Поэтому на сегодняшний день приоритетным направлением современной науки о питании является совершенствование норм физиологических потребностей в пищевых веществах и энергии различных категорий населения страны. Вследствие этого одной из важных задач государства является обеспечение населения пищевыми продуктами, богатыми биологически активными веществами, для поддержания необходимого витаминного и минерального баланса.

В Сибири в силу суровых климатических условий, короткого вегетационного периода население не всегда в достаточном количестве обеспечено свежими продуктами растительного происхождения, поэтому местное население прежде всего ориентировано на потребление ягод, видовое разнообразие которых очень большое. Вместе с тем жители Кузбасса потребляют фруктов менее четверти физиологической потребности организма, а ягод и того меньше, это вызывает острую необходимость увеличить их производство [1, 2]. Систематическое употребление в пищу ягод усиливает защитные силы организма, делая его устойчивым против многих болезней, способствует долголетию и высокой трудоспособности. Ягоды используют в пищу в свежем виде, сушеном и замороженном, а также для приготовления варенья, соков, сиропов, настоек, желе, напитков, ликеров, начинок для конфет, тортов и т.д. [2].

Одной из ценнейших ягодных культур Сибирского региона является облепиха. Она содержит богатейший набор компонентов, обладающих физиологической активностью. Ягоды облепихи представляют собой уникальный природный поливитаминный концентрат. Они содержат значительное количество β-каротина и каротиноидов, витаминов С и Е, а также различные витамины группы В, F и Р. Ягоды облепихи не только поддерживают нормальный обмен веществ, но и освобождают организм от токсинов, способствуют поддержанию здоровья и долголетия [3].

Замораживание относится к наиболее перспективным методам консервирования. В замороженных продуктах лучше, чем в консервированных любым другим способом, сохраняются основные компоненты, определяющие пищевую ценность, в том числе и такие лабильные, как витамины, полифенолы и др.

По органолептическим показателям – вкусу, аромату, цвету, внешнему виду замороженные продукты мало отличаются от свежих. Наиболее эффективно применение консервирования методом замораживания для переработки плодов и овощей. Наиболее результативно быстрое замораживание при температуре минус 30 °С и ниже [2, 4].

Базовыми величинами при расчетах технологических процессов, в которых происходит нагревание, охлаждение или замораживание пищевого продукта, являются теплофизические характеристики, они также необходимы при проектировании и подборе технологического оборудования для осуществления такого рода процессов. Поэтому для разработки эффективных и энергосберегающих технологий низкотемпературного консервирования и переработки ягод облепихи необходима достоверная и объективная информация об их теплофизических характеристиках.

Таким образом, целью настоящей работы является определение теплофизических характеристик свежих и замороженных ягод облепихи.

Объекты и методы исследований

Для исследования нами были выбраны плоды пяти сортов облепихи: Масличная, Дар Катуни, Чуйская, Золотой початок, Пантелеевская. Указанные сорта выращиваются в ГУП «Плодопитомник-1» г. Кемерово. Для исследований выбирались плоды и ягоды, достигшие полной зрелости, здоровые, не имеющие механических повреждений. Плоды облепихи сортировали, удаляли плодоножки, тщательно мыли водопроводной водой и подсушивали.

Содержание влаги в ягодах определяли высушиванием до постоянной массы при температуре 105 °С. Содержание растворимых сухих веществ определяли рефрактометрически. Количественное определение сахаров в ягодах проводили феррицианидным методом.

Методы двух температурно-временных интервалов относятся к скоростным методам определения теплофизических характеристик, которые позволяют в одном опыте определять температуропроводность $\boldsymbol{a}$, теплопроводность $\boldsymbol{\lambda}$, объемную теплоемкость $\boldsymbol{c_V}$ твердых, жидких, сыпучих продуктов при температурах выше и ниже криоскопической точки [5]. Из группы методов двух температурно-временных интервалов наилучшим образом для практического применения подходит первый буферный метод [6].

Принципиальная схема лабораторной установки, предназначенной для экспериментального определения теплофизических характеристик пищевых продуктов первым буферным методом двух температурно-временных интервалов, приведена в статье [7].

Значения величин теплопроводности (λ) и температуропроводности (a) объекта исследования определяли, используя систему уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{t_н - t_1}{t_н - t_0} = \left(1 + \dfrac{\lambda \,/\left(b\sqrt{a}\right) - 1}{\lambda \,/\left(b\sqrt{a}\right) + 1}\right) \displaystyle\sum_{i=0}^{\infty} \left(\left(\dfrac{1 - \lambda \,/\left(b\sqrt{a}\right)}{\lambda \,/\left(b\sqrt{a}\right) + 1}\right)^i erfc\left(\dfrac{h}{2\sqrt{a\tau_1}}\left(\dfrac{h_B}{h}\sqrt{\dfrac{a}{a_B}} + 1 + 2\cdot i\right)\right)\right) \\ \dfrac{t_н - t_2}{t_н - t_0} = \left(1 + \dfrac{\lambda \,/\left(b\sqrt{a}\right) - 1}{\lambda \,/\left(b\sqrt{a}\right) + 1}\right) \displaystyle\sum_{i=0}^{\infty} \left(\left(\dfrac{1 - \lambda \,/\left(b\sqrt{a}\right)}{\lambda \,/\left(b\sqrt{a}\right) + 1}\right)^i erfc\left(\dfrac{h}{2\sqrt{a\tau_2}}\left(\dfrac{h_B}{h}\sqrt{\dfrac{a}{a_B}} + 1 + 2\cdot i\right)\right)\right) \end{cases} \quad (1)$$

где h – толщина исследуемого объекта, м; h_B – толщина буферного слоя, м; a_B – температуропроводность теплоприемника, м^2/с; $b = \lambda_B / \sqrt{a_B}$ – постоянная теплоприемника, λ_B – теплопроводность теплоприемника, Вт/(м·К); $t_н$ – температура нагревателя в установившемся режиме работы, К; t_0 – начальная температура, К; t_1, t_2 – разность значений $t_н$ (К) и температуры в буферном слое t (К) в моменты времени τ_1 и τ_2 (с).

Объемную теплоемкость c_V определяли из формулы

$$c_V = \lambda / a.$$

Массовую теплоемкость c_m определяли по формуле

$$c_m = c_V / \rho,$$

где ρ – плотность ягоды, кг/м^3.

Результаты и их обсуждение

Для проведения исследований свежие ягоды облепихи измельчались. Полученное пюре заливалось в полость лабораторной установки для определения теплофизических характеристик [7] таким образом, чтобы при установке нагревателя не было воздушной прослойки и пузырьков воздуха между поверхностями нагревателя и исследуемого продукта. Методика определения теплофизических характеристик ягод в замороженном состоянии имела некоторые отличительные особенности. Подготовленное измельченное сырье закладывали в цилиндрическую латунную обечайку, внутренние размеры которой соответствовали полости лабораторной установки [7]. Обечайка изготовлена таким образом, чтобы при увеличении объема ягоды вследствие замораживания увеличивалась только высота замороженного цилиндра.

Затем измельченную, деаэрированную ягоду замораживали при температуре минус 25 °С, полученную замороженную заготовку выдавливали из обечайки, определяли ее вертикальный размер и размещали ее в измерительной полости установки [7]. До того как замороженную ягоду разместить в измерительной полости, измерительный комплекс выдерживался при температуре 0÷2 °С; после того как заготовка помещалась в измери-

тельной полости, устанавливался нагреватель и лабораторная установка устанавливалась в низкотемпературной каскадной холодильной камере при температуре минус 50 ÷ минус 45 °С. За счет того, что лабораторный комплекс обладает достаточно большой тепловой инерцией, контактирующие с поверхностью нагревателя и рабочей поверхностью теплоприемника торцы замороженного образца сначала подтаивали, затем примораживались к этим поверхностям. Таким образом, между образцом и рабочими поверхностями создавался идеальный тепловой контакт. Термометрическая система выдерживалась при температуре минус 50 ÷ минус 45 °С до установления теплового равновесия в термометрической системе. При определении теплофизических характеристик замороженной ягоды температура поверхности нагревателя термостатировалась при температуре минус 22 ÷ минус 25 °С. Для поддержания температуры нагревателя в указанном температурном диапазоне в цепь термостатирующего устройства включали термистор сопротивлением 5 кОм.

При включении нагревателя происходит интенсивный разогрев его рабочей поверхности до заданной температуры. Теплота от нагревателя через исследуемый материал передается теплоприемнику, температура которого повышается. Температура рабочей поверхности нагревателя, буферного слоя и свободной поверхности теплоприемника фиксируется в зависимости от времени. В результате проведения теплотехнического эксперимента были получены термограммы, рис. 1.

Систему уравнений (1) относительно λ и a решали численными методами. Для определения величин теплопроводности и температуропроводности на кривой 1 выбирали две группы точек с определенным интервалом (рис. 1, группы I и II). Каждая из точек одной группы составляла пару с каждой точкой другой группы. В качестве окончательных величин теплопроводности и температуропроводности исследуемого сорта ягоды принимали средние значения λ и a, которые были определены для каждой пары точек.

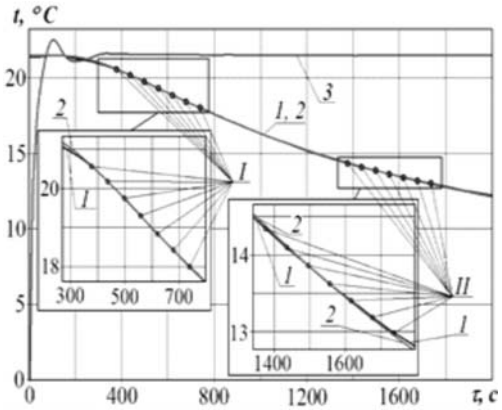

Рис. 1. Экспериментальные зависимости для определения теплофизических характеристик ягод облепихи сорта «Дар Катуни»: 1 – разность температур между нагревателем и буферным слоем; 2 – теоретическая зависимость разности температур между нагревателем и буферным слоем; 3 – температура поверхности нагревателя; I – точки, координаты которых подставляются в первое уравнение системы (1); II – точки, координаты которых подставляются во второе уравнение системы (1)

Определенные с помощью изложенной методики значения теплофизических характеристик исследованных сортов ягод облепихи в свежем и замороженном состоянии приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Теплофизические характеристики свежих ягод исследованных сортов облепихи

Сорт ягод	$a \cdot 10^7$, м^2/с ($\overline{X}$ ±5 %)	λ, Вт/(м·К) ($\overline{X}$ ±5 %)	$c_V \cdot 10^{-6}$, Дж/(м^3·К) ($\overline{X}$ ±5 %)	ρ, кг/м^3 ($\overline{X}$ ±2 %)	c_m, Дж/(кг·К) ($\overline{X}$ ±5 %)
Масличная	1,65	0,58	3,52	932	3772
Дар Катуни	1,61	0,59	3,660	957	3829
Чуйская	1,64	0,59	3,60	943	3815
Золотой початок	1,60	0,58	3,56	960	3711
Пантелеевская	1,62	0,59	3,64	968	3762

Таблица 2

Теплофизические характеристики замороженных ягод исследованных сортов облепихи

Сорт ягод	$a \cdot 10^7$, м^2/с ($\overline{X}$ ±5 %)	λ, Вт/(м·К) ($\overline{X}$ ±5 %)	$c_V \cdot 10^{-6}$, Дж/(м^3·К) ($\overline{X}$ ±5 %)	ρ, кг/м^3 ($\overline{X}$ ±2 %)	c_m, Дж/(кг·К) ($\overline{X}$ ±5 %)
Масличная	10,92	2,06	1,89	871	2166
Дар Катуни	10,64	2,07	1,95	884	2201
Чуйская	10,84	2,08	1,92	862	2226
Золотой початок	10,31	1,99	1,93	873	2211
Пантелеевская	10,54	2,05	1,94	887	2193

На теплофизические характеристики ягод в наибольшей степени способны повлиять такие физико-химические показатели, как массовая доля влаги, сахаров, растворимых сухих веществ, значения которых для исследованных сортов ягод облепихи приведены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-химические показатели ягод облепихи

Сорт	Массовая доля влаги, % ($\overline{X}$ ±0,1%)	Массовая доля сахаров, % ($\overline{X}$ ±0,02%)	Растворимые сухие вещества, % ($\overline{X}$±0,1)
Масличная	87,4	2,56	7,0
Дар Катуни	87,8	5,32	9,3
Чуйская	88,4	3,51	9,2
Золотой початок	82,1	3,99	8,5
Пантелеевская	87,0	5,55	10,2

Как видно из полученных данных, массовая доля влаги в исследованных сортах облепихи в среднем составила 86,5 %, на долю сахаров приходится от 37 % (сорт «Масличная») до 57 % (сорт «Дар Катуни») от общего содержания растворимых сухих веществ.

Из результатов, приведенных в табл. 1 и 2, видно, что значения теплофизических характеристик ягод в наибольшей степени определяются массовой долей содержащейся в них влаги. При замораживании ягод теплофизические характеристики значительно изменяются: температуропроводность в среднем возрастает в 6,5 раза, теплопроводность возрастает в 3,5 раза, теплоемкость уменьшатся в 1,7 раза.

Колебания в значениях теплофизических характеристик для ягод различных сортов облепихи весьма незначительны, поэтому для теплотехнических расчетов технологических процессов, связанных с температурным воздействием, следует использовать средние значения теплофизических характеристик.

Для свежих ягод облепихи: a = 1,62·10^{-7} м^2/с; λ = 0,59 Вт/(м·К); c_m = 3777 Дж/(кг·К). Для замороженных ягод облепихи: a = 10,65·10^{-7} м^2/с; λ = 2,05 Вт/(м·К); c_m = 2199 Дж/(кг·К).

Список литературы

1. Губанов, И.А. Энциклопедия природы России. Пищевые растения: справ. издание / И.А. Губанов. – М., 1996. – 556 с.

2. Короткий, И.А. Исследование и разработка технологий замораживания и низкотемпературного хранения плодово-ягодного сырья Сибирского региона: дис. … д-ра техн. наук: 05.18.04: защищена 04.06.2009 / Короткий Игорь Алексеевич. – Кемерово, 2009. – 410 с.

3. Кошелев, Ю.А. Облепиха: монография / Ю.А. Кошелев, Л.Д. Агеева. – Бийск: НИЦ БПГУ им. В.М. Шукшина, 2004. – 320 с.

4. Большаков, С.А. Холодильная техника и технология продуктов питания / С.А. Большаков. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 304 с.

5. Волькенштейн, В.С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов. – Л.: Издательство «Энергия», 1971. – 145 с.

6. Короткий, И.А. Применение метода двух температурно-временных интервалов для определения теплофизических характеристик пищевых продуктов и материалов / И.А. Короткий, Е.В. Короткая // Известия вузов. Пищевая технология. – 2008. – № 2–3. – С. 109–111.

7. Короткий, И.А. Теплофизические характеристики ягод облепихи // Вестник КрасГАУ. – 2008. – № 2. – С. 287–290.

THE CHANGE OF THERMAL AND PHYSICAL CHARACTERISTICS OF SEA BUCKTHORN BERRIES DURING FREEZING

I.A. Korotkiy[1], E.V. Korotkaya[1,*], V.V. Kireev[2]

[1]Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia

[2]LLC "Tulunskiy myasnoiy dvor", 31, Myasokombinatskaya Str., Tulun, 665268, Russia

**e-mail: lena_short@mail.ru*

Received: 08.02.2016
Accepted: 15.04.2016

Sea buckthorn berries occupy important place in the diet of the inhabitants of Siberia. They are the richest source of vitamins C and E, contain significant amounts of carotenoids, various vitamins of B, F, P groups, minerals, and contribute to the maintenance of health and longevity. One of the most effective methods of preserving fruits and berries is freezing. To develop efficient and energy-

saving technology of low temperature preservation and storage of fruits and berries, particularly berries of sea buckthorn, we need reliable and objective information about their thermal and physical characteristics over the entire range of temperature exposure. In addition, knowledge of the thermal and physical characteristics is necessary for designing and selecting the process equipment to implement the freezing processes. This article is devoted to investigations of thermal and physicals characteristics of buckthorn berries of different varieties in fresh and frozen conditions. The first buffer method of two temperature-time intervals has been selected for determination of thermal and physicals characteristics. The methodology of the experiment and data processing method for determining the thermal properties of buckthorn berries at temperatures above cryoscopic point and after freezing have been described. The measured values of thermal and physical characteristics of five buckthorn berry varieties in fresh and frozen conditions are given. It has been established that the values of thermal and physical characteristics of the berries are determined to the greatest extent by their moisture mass fraction. Fluctuations in the values of thermal and physical characteristics of different varieties of sea buckthorn berries are very small, therefore, average values of thermal and physical characteristics should be used for heat engineering calculations of technological processes connected with thermal effects.

Thermal and physical characteristics, buckthorn berries, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity

References

1. Gubanov I.A. *Pishchevye rasteniya. Entsiklopediya prirody Rossii* [Encyclopedia of nature of Russia. Food plants.]. Moscow, ABF Publ., 1996. 556 p.

2. Korotkiy I.A. *Issledovanie i razrabotka tekhnologij zamorazhivaniya i nizkotemperaturnogo khraneniya plodovo-yagodnogo syr'ya Sibirskogo regiona. Diss. dokt. tekh. nauk* [Research and development of technologies of freezing and low-temperature storage of fruit and berry raw materials of the Siberian region. Dr. eng. sci. diss.]. Kemerovo, 2009, 410 p.

3. Koshelev Yu.A., Ageeva L.D. *Oblepikha* [Sea Buckthorn]. Biysk, ASHPU Publ., 2004. 320 p.

4. Bol'shakov S.A. *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya produktov pitaniya* [Refrigeration and food technology]. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 304 p.

5. Vol'kenshteyn V.S. *Skorostnoy metod opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik materialov* [High-Speed method of determining thermophysical characteristics of materials]. Leningrad, Energiya Publ., 1971. 145 p.

6. Korotkiy I.A., Korotkaya E.V. Primenenie metoda dvukh temperaturno-vremennykh intervalov dlya opre-deleniya teplofizicheskikh kharakteristik pishchevykh produktov i materialov [Application of two temperature-time intervals method for determination of the thermophysical characteristics of foods and materials*]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* [Transactions of Higher Educational Institutions, Food Technology], 2008, no. 2–3, pp. 109–111.

7. Korotkiy I.A. Teplofizicheskie kharakteristiki yagod oblepikhi [The thermophysicals characteristics of buckthorn berries]. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2008, no. 2, pp. 287–290.

Дополнительная информация / Additional Information

Короткий, И.А. Изменение теплофизических характеристик ягод облепихи при замораживании / И.А. Короткий, Е.В. Короткая, В.В. Киреев // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – Т. 41. – № 2. – С. 108–112.

Korotkiy I.A., Korotkaya E.V., Kireev V.V. The change of thermal and physical characteristics of sea buckthorn berries during freezing. *Food Processing: Techniques and Technology,* 2016, vol. 41, no. 2, pp. 108–112 (in Russ.).

Короткий Игорь Алексеевич
д-р техн. наук, профессор, декан заочного факультета, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, тел.: +7 (3842) 73-43-44, e-mail: krot69@mail.ru

Короткая Елена Валерьевна
д-р техн. наук, профессор кафедры аналитической химии и экологии, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, тел.: +7 (3842) 39-68-30, e-mail: lena_short@mail.ru

Киреев Владимир Васильевич
д-р техн. наук, профессор, генеральный директор, ООО «Тулунский мясной двор», 665268, Россия, г. Тулун, ул. Мясокомбинатская, 31

Igor' A. Korotkiy
Dr.Sci.(Eng.), Professor, Dean of the Correspondence Faculty, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, phone: +7 (3842) 73-43-44, e-mail: krot69@mail.ru

Elena V. Korotkaya
Dr.Sci.(Eng.), Professor of the Department of Analytical Chemistry and Ecology, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-30,
e-mail: lena_short@mail.ru

Vladimir V. Kireev
Dr.Sci.(Eng.), Professor, General Director, LLC “Tulunskiy myasnoiy dvor”,31, Myasokombinatskaya Str., Tulun, 665268, Russia