

## ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОВОЩНОГО ПЮРЕ В ПРОЦЕССЕ ДВУХСТАДИЙНОГО ВЫПАРИВАНИЯ

Установлен характер изменения теплофизических характеристик овощного пюре. Определены зависимости для расчета коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости.

**Ключевые слова:** теплофизические характеристики, овощное пюре, температуропроводность, теплопроводность, удельная теплоемкость, выпаривание.

Для обоснования выбора рациональных режимов процесса концентрирования плодовоовощных пюре [1] необходимо знать характер изменения теплофизических характеристик (коэффициента температуропроводности  $a$ , м<sup>2</sup>/с, коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(мЧК), удельной теплоемкости  $c$ , Дж/(кгЧК)) обрабатываемого пюре.

Объектом исследования являлось поликомпонентное овощное пюре, состоящее из следующих овощей в соотношении: баклажан – 20 %, кабачок – 20 %, болгарский перец – 16 %, томат – 15 %, морковь – 14 %, лук – 10 %, чеснок – 5 %.

Теплофизические характеристики исследуемого поликомпонентного овощного пюре являются функциями состояния и свойств вещества, зависящими от многих факторов, к которым следует отнести химический состав и структуру. При определении теплофизических характеристик использован метод нестационарного теплового режима, основанный на решении задачи теплопроводности для начальной стадии процесса, а именно метод двух температурно-временных точек [2].

Начальная стадия охватывает малые промежутки времени, характеризуемые числом Фурье  $Fo \leq 0,55$ . Эксперимент, основанный на теории этой стадии теплопроводности, является непродолжительным. При этом исключается влияние эффекта термовлагопроводности на исследуемые тепловые свойства. Задача сводится к совместному решению дифференциальных уравнений теплопроводности для одномерного потока:

для исследуемого пюре:

$$\frac{\partial T_M(x, \tau)}{\partial \tau} = a_M \frac{\partial^2 T_M(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (0 < x < h); \quad (1)$$

для эталона:

$$\frac{\partial T_0(x, \tau)}{\partial \tau} = a_0 \frac{\partial^2 T_0(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (h < x < \infty); \quad (2)$$

где  $x$  – текущая координата;  $h$  – высота слоя исследуемого пюре;  $\tau$  – любой момент времени;  $T_M$  – температура исследуемого пюре, К;  $T_0$  – температура эталона, К.

Начальные и граничные условия этой задачи выражаются следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T_M(x, 0) &= T_0(x, 0) = T_0 \\ T_M(h, \tau) &= T_0(h, \tau) \\ \lambda_M \frac{\partial T_M(h, \tau)}{\partial x} &= \lambda_0 \frac{\partial T_0(h, \tau)}{\partial x} \\ T_M(0, \tau) &= T_H = const \\ T_0(\infty, \tau) &= T_0 \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

где  $T_H$  – температура нагревателя, К;  $T_0$  – температура исследуемого пюре и эталона в начальный момент времени, К.

Для температуры  $T$  в месте стыка пюре и эталона (когда  $x=h$ ) решение уравнений (1), (2) учетом (3) дается в виде бесконечного ряда:

$$\frac{T}{T_H} = (1+a) [\operatorname{erfc}(y) - a \operatorname{erfc}(3y) + \dots]; \quad (4)$$

где  $a = \frac{\lambda_M \sqrt{a_0} \sqrt{\lambda_0} \sqrt{a_M}}{\lambda_M \sqrt{a_0} + \lambda_0 \sqrt{a_M}}$ ;  $y = \frac{h}{2\sqrt{a\tau}}$ ;  $\operatorname{erfc}(y) = 1 - \operatorname{erf}(y)$  (5)

$\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\pi} \int_0^y e^{-y^2} dy$  – интеграл вероятности Гаусса.

Для малых значений  $\tau$  решение уравнения (4) ограничивается первым членом ряда. В этом случае решение имеет вид:

$$(T/T_H) = (1+a) [1 - \operatorname{erfc}(y)].$$

Решая уравнения (1) и (2) с учетом (3), можно определить  $a$ ,  $\lambda$  и  $c$  для исследуемого продукта:

$$a_M = \frac{h^2}{4y_1^2 \tau_1}; \lambda_M = b\epsilon\sqrt{a_M}; c_M = \frac{\lambda_M}{a_M \rho_M} \quad (6)$$

где  $y$  и  $\epsilon$  – некоторые безразмерные величины, которые определяются по таблицам, исходя из найденных опытных соотношений  $\tau_2/\tau_1$ ;  $\tau_1$  – время, в течение которого температура на границе соприкосновения эталонного тела исследуемого образца пюре достигнет  $\Delta T_1 = k_1 \cdot \Delta T$ ,  $\tau_2$  – время, в течение которого эта температура достигнет  $\Delta T_2 = k_2 \cdot \Delta T$ ;  $k_1$  и  $k_2$  – заранее заданные значения, равные 0,75 и 0,5;  $\Delta T$  – разность между температурой нагревателя  $T_H$  и температурой в месте стыка исследуемого продукта и эталона  $T$ , т.е.  $\Delta T = T_H - T$ ;  $\rho_M$  – плотность исследуемого поликомпонентного овощного пюре,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Определение зависимости теплофизических характеристик исследуемого поликомпонентного овощного пюре проводилось на измерительной установке *Cossfield RT-1394H*. [3] Методика проведения эксперимента включала следующие операции:

- заливку заданного объема ( $250 \text{ см}^3$ ) исследуемого вида пюре в полусферическое углубление внешнего цилиндра установки *Cossfield RT-1394H*;
- установку внутреннего цилиндра;
- включение термостата;
- приведение во вращение внешнего цилиндра измерительного устройства с заданной угловой скоростью  $\omega = 0,1 \text{ м/с}$ , обеспечивающей создание в слое исследуемой жидкости скорости сдвига  $\gamma = 2,5 \text{ м/с}$ ;
- включение нагревателя измерительного устройства;
- регистрацию установившейся среднеинтегральной температуры в слое нагревателя измерительного устройства;
- отключение нагревателя измерительного устройства;
- регистрацию через заданный интервал времени  $\Delta\tau = 10^\circ\text{C}$  среднеинтегральной температуры нагревателя измерительного устройства;
- отключение привода внешнего цилиндра при достижении стационарной температуры;
- определение теплофизических характеристик исследуемого вида пюре по экспериментальной информации с использованием расчетных соотношений, полученных в ходе решения обратной задачи теплопроводности с приме-

нием стандартных программ статистической обработки данных.

Измерительная установка для определения теплофизических характеристик исследуемого поликомпонентного овощного пюре выполнена в соответствии с функциональной схемой (рис. 1). [4]

Привод внешнего цилиндра представляет собой электродвигатель постоянного тока 3 с редуктором. Изменение угловой скорости вращения цилиндра осуществляется за счет изменения напряжения на обмотке расположенной в персональном компьютере 12. При вращении внешнего цилиндра, за счет сил вязкого трения, вращающий момент передается внутреннему цилиндру.

Через трос 7 (см. рис. 1) и рычажную систему 8 силовое воздействие передается на упругий элемент 1 вибросигнального преобразователя силы, выходным сигналом которого является частота  $f$  электрического тока.

Основу измерительного устройства составляют два коаксиально расположенных цилиндра 1 и 2 (см. рис. 2). Внутренний цилиндр 1 из капролона при помощи подшипников 9 установлен соосно по отношению к наружному цилиндру 2 и состоит из трех коаксиальных цилиндрических слоев.

На внешней поверхности внутреннего коаксиального цилиндрического слоя по спирали 7 намотаны медным проводом термопреобразователь сопротивления и манганиновым проводом электрический нагреватель 3. Выводы от

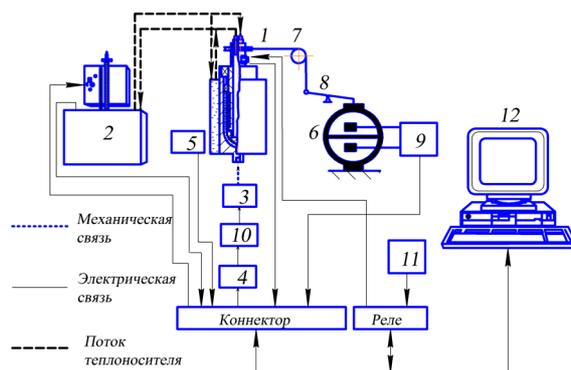


Рисунок 1. Функциональная схема измерительной установки: 1 – измерительное устройство; 2 – жидкостный термостат; 3 – электродвигатель постоянного тока; 4 – усилитель мощности У-13Н; 5 – преобразователь угловой скорости вращения внешнего цилиндра; 6 – вибросигнальный преобразователь силы; 7 – трос; 8 – рычажная система; 9 – подшипник; 10 – выпрямитель; 11 – блок питания; 12 – персональный компьютер, оснащенный многофункциональной платой сбора данных РС1МЮ-16Е-1

термопреобразователя сопротивления и электрического нагревателя пропущены через канал на внешней поверхности цилиндра и подключены к разъему 8.

Термопреобразователь сопротивления и нагреватель отделены от анализируемого пюре гильзой из капрлона 4. Нижний торец 5 внутреннего цилиндра выполнен полусферическим, что способствует наиболее устойчивому режиму течения вязкоупругих жидкостей в зазоре между коаксиальными цилиндрами.

К нижней части наружного цилиндра прикреплено основание, имеющее полусферическое углубление. Таким образом, зазор между внутренним и внешним цилиндрами в нижней части равен зазору между боковыми поверхностями цилиндров. К боковой поверхности наружного цилиндра прикреплена водяная рубашка 10 из нержавеющей стали, предназначенная для термостатирования внешнего цилиндра и поддержания граничных условий первого рода в соответствии с физической и математической моделями измерительного устройства.

Управление ходом эксперимента и обработка измерительной информации осуществлялась посредством прибора, разработанного в интегрированной среде управления техническими объектами и технологическими процессами.

Температуропроводность и теплопроводность определялись по эмпирическим формулам, полученным из решения системы дифференциальных уравнений, составленных для данной системы двух тел, в одно из которых входят неизвестные теплофизические характеристики.

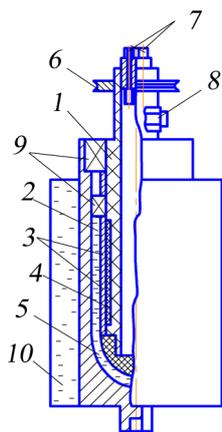


Рисунок 2. Конструкция измерительного устройства:

- 1 – внутренний цилиндр; 2 – наружный цилиндр;
- 3 – нагреватель; 4 – гильза; 5 – нижний торец;
- 6 – шкив; 7 – спираль; 8 – разъем; 9 – подшипник;
- 10 – водяная рубашка

Относительно этих характеристик решается система уравнений, включающая параметры проведенного опыта. Так как исследуемые два тела соприкасаются по одной общей плоскости, то по принципам математической физики можно составить два дифференциальных уравнения с едиными начальными и граничными условиями первого рода, обусловленных параметрами проводимого опыта.

Температуропроводность  $a_M$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) поликомпонентного овощного пюре определяется по уравнению

$$a_M = \frac{x^2}{4(z'')\tau''}, \quad (7)$$

где  $x$  – толщина слоя овощного пюре, м;  $z''$  – интеграл Гаусса, определяемый в зависимости от отношения  $\tau''/\tau'$ ;  $\tau''$ ,  $\tau'$ ; – время изменения температуры в плоскости соприкосновения овощного пюре с эталоном, с.

Теплопроводность  $\lambda_M$  ( $\text{Вт}/(\text{мЧК})$ ) исследуемого образца пюре определяется по эмпирической формуле

$$\lambda_M = \lambda_{\varepsilon} \frac{1-h}{1+h} \sqrt{\frac{a_M}{a_{\varepsilon}}}, \quad (8)$$

где  $\lambda_M$ ,  $a_M$  – теплопроводность и температуропроводность образца исследуемого пюре;  $\lambda_{\varepsilon} = 0,184 \text{ Вт}/(\text{мЧК})$ ,  $a_{\varepsilon} = 15,74 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$  – теплопроводность и температуропроводность эталона;  $h$  – вспомогательная величина, определяемая по формуле

$$h = \frac{t''}{t_{\text{гп}} [1 - \Phi(z'')]} - 1, \quad (9)$$

где  $t''$  – температура в плоскости соприкосновения образца пюре и эталона, определяемая по полученной диаграмме,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{гп}}$  – температура греющей поверхности,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Phi(z'')$  – функция Гаусса.

Удельная теплоемкость поликомпонентного овощного пюре  $c_M$  ( $\text{Дж}/(\text{кгЧК})$ ) определяется по зависимости

$$c_M = \lambda_M / (a_M \rho_M), \quad (10)$$

где  $\rho_M$  – плотность поликомпонентного овощного пюре,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Значения теплофизических характеристик поликомпонентного овощного пюре для диапазона температур 298...353 К приведены в таблице 1.

Управление ходом эксперимента и обработка измерительной информации осуществляется посредством виртуального прибора, разработанного в интегрированной среде управ-

Таблица 1. Теплофизические характеристики поликомпонентного овощного пюре

№ п./п.	Интервал температур	Ед. изм.	Образцы пюре	
			<i>W</i> ~81,07%	<i>W</i> ~69,95 %
			исходное	концентрированное
Коэффициент температуропроводности $a \times 10^8 \text{ м}^2/\text{с}$				
1	25	°С	9,72±0,02	9,21±0,02
2	30	°С	9,81±0,02	9,23±0,02
3	35	°С	9,92±0,02	9,29±0,02
4	40	°С	10,01±0,02	9,34±0,03
5	45	°С	10,12±0,02	9,38±0,03
6	50	°С	10,20±0,02	9,43±0,02
7	55	°С	10,27±0,02	9,48±0,02
8	60	°С	10,35±0,02	9,51±0,03
9	65	°С	10,47±0,02	9,63±0,03
10	70	°С	10,55±0,02	9,67±0,03
11	75	°С	10,62±0,02	9,70±0,02
12	80	°С	10,71±0,02	9,76±0,02
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)				
13	25	°С	0,401±0,003	0,361±0,002
14	30	°С	0,406±0,003	0,364±0,001
15	35	°С	0,411±0,003	0,367±0,001
16	40	°С	0,416±0,003	0,370±0,001
17	45	°С	0,422±0,003	0,373±0,001
18	50	°С	0,426±0,003	0,377±0,001
19	55	°С	0,429±0,002	0,380±0,001
20	60	°С	0,434±0,002	0,382±0,001
21	65	°С	0,439±0,002	0,388±0,002
22	70	°С	0,443±0,003	0,391±0,002
23	75	°С	0,447±0,002	0,393±0,002
24	80	°С	0,451±0,001	0,398±0,002
Массовая удельная теплоемкость $c$ , Дж/(кг·К)				
25	25	°С	3949,63±0,01	3570,89±0,01
26	30	°С	3959,71±0,01	3589,62±0,01
27	35	°С	3969,24±0,01	3599,56±0,01
28	40	°С	3978,69±0,02	3614,05±0,01
29	45	°С	3991,02±0,02	3624,78±0,01
30	50	°С	3998,17±0,02	3640,74±0,01
31	55	°С	4004,78±0,02	3651,76±0,01
32	60	°С	4015,23±0,02	3664,48±0,01
33	65	°С	4021,03±0,02	3675,48±0,02
34	70	°С	4032,19±0,02	3690,71±0,02
35	75	°С	4040,67±0,02	3701,79±0,01
36	80	°С	4047,12±0,02	3721,17±0,01
37	Плотность $\rho$	кг/м <sup>3</sup>	1043,4	1096,6

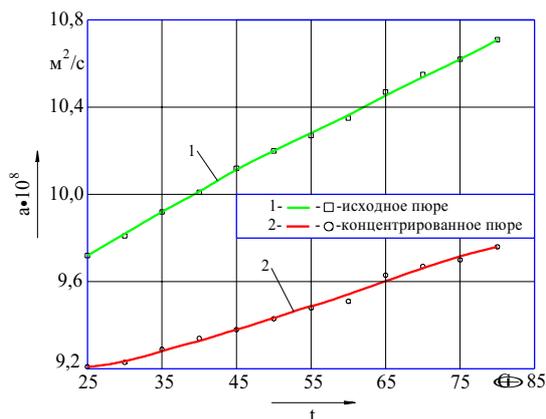


Рисунок 3. Зависимость коэффициента температуропроводности поликомпонентного овощного пюре от температуры при влажности  $W=69,95\%$  и  $W=81,07\%$

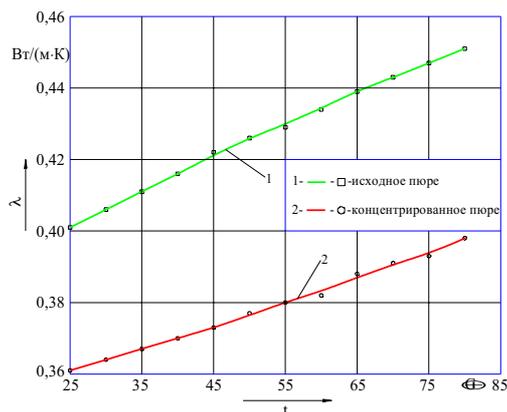


Рисунок 4. Зависимость коэффициента теплопроводности поликомпонентного овощного пюре от температуры при влажности  $W=69,95\%$  и  $W=81,07\%$

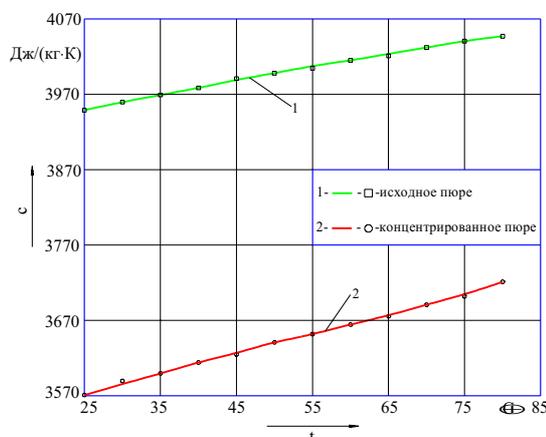


Рисунок 5. Зависимость удельной теплоемкости поликомпонентного овощного пюре от температуры при влажности  $W=69,95\%$  и  $W=81,07\%$

ления техническими объектами и технологическими процессами. Полученные опытные данные были обработаны на ЭВМ, в результате были получены уравнения (11-16).

Значения теплофизических характеристик поликомпонентного овощного пюре для интервала температур (298...353 K):

при  $W = 69,95\%$ :

$$c = 2,6139 \cdot T + 3508,2; R^2 = 0,9979; \quad (11)$$

$$\lambda = 0,0007 \cdot T + 0,3436; R^2 = 0,9957; \quad (12)$$

$$a = 0,0104 \cdot T + 8,9247; R^2 = 0,9897; \quad (13)$$

при  $W = 81,07\%$ :

$$c = 1,7711 \cdot T + 3907,2; R^2 = 0,9970; \quad (14)$$

$$\lambda = 0,0009 \cdot T + 0,3795; R^2 = 0,9973; \quad (15)$$

$$a = 0,0179 \cdot T + 9,2875; R^2 = 0,9980, \quad (16)$$

где  $R^2$  – коэффициент корреляции.

Зависимости теплофизических характеристик (коэффициентов теплопроводности  $\lambda$ , температуропроводности  $a$  и теплоемкости  $c$ ) от температуры исследуемого поликомпонентного овощного пюре представлены на рис. 5-7. Как видно из них, зависимости теплофизических характеристик от температуры носят линейный характер. Влажность оказывает большее влияние на исследуемые теплофизические характеристики (коэффициенты теплопроводности  $\lambda$ , температуропроводности  $a$  и теплоемкости  $c$ ), чем температура.

Из анализа данных (рис. 3–5) видно, что с повышением температуры удельная теплоемкость, теплопроводность и коэффициент температуропроводности исследуемого поликомпонентного овощного пюре увеличиваются.

6.06.2011

**Список литературы:**

1. Вертяков, Ф. Н. Производство концентрированных фруктовых и овощных пюре [Текст] / Ф. Н. Вертяков, А. Н. Остриков. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – 452 с.
2. Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов [Текст]: справочник / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – М.: Агропромиздат, 1990. – 287 с.
3. Каталог приборов и научно-исследовательского оборудования Coesfeld GmbH & Co. KG. Dortmund. Germany, 2004. – 87 с.
4. Мозгова Г. В. Измерительная установка для определения зависимости теплофизических и реологических характеристик жидких материалов от скорости сдвига [Текст] / Г.В. Мозгова, С.В. Ходилин // Труды ТГТУ. – 2005. – Вып. 17. – с. 92–96.

Сведения об авторах:

**Остриков Александр Николаевич**, заведующий кафедрой процессы и аппараты химических и пищевых производств Воронежской государственной технологической академии, заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: oan@vgta.vrn.ru

**Трушечкин Алексей Викторович**, студент факультета пищевых машин и автоматов Воронежской государственной технологической академии  
394000, г. Воронеж, проспект Революции, 19

**Вертяков Федор Николаевич**, профессор кафедры технологии пищевых производств Оренбургского государственного университета, доктор технических наук,  
e-mail: fedor-vertyakov@yandex.ru

**Трубникова Валентина Николаевна**, старший преподаватель кафедры теоретическая и общая электротехника Оренбургского государственного университета  
460018, г.Оренбург, пр-т Победы, 13, e-mail: oan@vgta.vrn.ru

**UDC 664.841.8**

**Ostrikov A.N.<sup>1</sup>, Vetryakov F. N.<sup>2</sup>, Trushechkin A.B.<sup>1</sup>, Trubnikova V.N.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Voronezh state technological academy; <sup>2</sup>Orenburg state university

**THERMAL CHARACTERISTICS CHANGE IN VEGETABLE PUREE IN THE PROCESS OF TWO-STAGE EVAPORATION**

The author defined the nature of changes in the thermophysical characteristics of the vegetable puree and specified the dependences for calculating the coefficients of thermal diffusivity, thermal conductivity and heat capacity.

Key words: thermal properties, vegetable puree, thermal diffusivity, thermal conductivity, specific heat, evaporation.

**Bibliography:**

1. Vertyakov, F.N. Production concentrated fruit and a vegetable th of mashed potatoes [Text] / F.N. Vertyakov, A.N. Ostrikov. – Orenburg: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – 452 with.
2. Ginzburg, A. S. Heatphysics characteristics of foodstuff [Text]: a directory / A.S. Ginzburg, M.A. Gromov, G.I. Krasovsky. – M.: Agropromizdat, 1990. – 287 with.
3. Instrument and research equipment Coesfeld GmbH & Co.KG.Dortmund Catalogue. Germany, 2004. – 87 p.
4. Mozgova G.V. Measuring system of thermal and rheological liquid materiald shear rate characteristics the dependence determining [Text]/ G.V.Mozgova, S.V.Hodilin // Proceedings ТГТУ. – 2005. – issue. 17. – p. 92–96.