

Остриков Александр Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ФГБОУВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», т.: (919)2497597;

Трушечкин Алексей Викторович, аспирант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ФГБОУВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», т.: (920)2119847.

О ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ПОЛИКОМПОНЕНТНОГО ОВОЩНОГО ПЮРЕ (рецензирована)

Описан характер изменения теплофизических свойств поликомпонентного овощного пюре, получаемого методом двухстадийного выпаривания. Установлены зависимости для расчета основных теплофизических коэффициентов.

Ключевые слова: поликомпонентное пюре, теплофизические свойства, теплопроводность, температуропроводность, удельная теплоемкость, двухстадийное выпаривание.

Ostrikov Alexander Nicholaevich, Doctor of Technical Sciences, head of the Department "Processes and equipment of chemical and food industries" FSBEI HPO "Voronezh State University of Engineering Technologies", tel.: (919) 2497597;

Trushchkin Alexey Victorovich, post graduate student of the Department "Processes and equipment of chemical and food industries" of FSBEI HPO "Voronezh State University of Engineering Technologies", tel.: (920) 2119847.

ON THERMO PHYSICAL PROPERTIES OF MULTICOMPONENT VEGETABLE PUREE (reviewed)

The variations of thermophysical properties of multicomponent vegetable puree obtained by two-stage evaporation have been described. The dependences for calculation of the basic thermophysical coefficients have been determined.

Keywords: multicomponent puree, thermophysical properties, thermal conductivity, thermal diffusivity, specific heat, two-stage evaporation.

Одним из основных критериев, позволяющих подобрать оптимальные технологические режимы процесса выпаривания является характер изменения теплофизических свойств обрабатываемого сырья (плодоовощное пюре [2]), таких как коэффициент температуропроводности a , $\text{м}^2/\text{с}$, коэффициент теплопроводности λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и удельная теплоемкость c , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Исследования проводились на поликомпонентном овощном сырье, в состав которого входили следующие компоненты: томаты – 40 %, кабачок – 15 %, морковь – 15 %, болгарский перец (сладкий) – 15 %, лук – 14,5 %, красный стручковый перец – 0,5 %.

Химический состав и структура исследуемого пюре являются одними из основных факторов, определяющих теплофизические характеристики продукта. 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 [1].

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:

$$\frac{\partial T_3(x, \tau)}{\partial \tau} = a_3 \frac{\partial^2 T_3(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (0 < x < \infty); \quad (2)$$

где x – текущая координата; h – высота слоя исследуемого пюре; τ – любой момент времени; T_m – температура исследуемого пюре, К; T_3 – температура эталона, К.

Начальные и граничные условия этой задачи выражаются следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T_M(x,0) &= T_3(x,0) = T_0 \\ T_M(h,\tau) &= T_3(h,\tau) \\ \lambda_M \frac{\partial T_M(h,\tau)}{\partial x} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3(h,\tau)}{\partial x} \\ T_M(0,\tau) &= T_H = const \\ T_3(\infty,\tau) &= T_0 \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

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:

$$a = \frac{\lambda_M \sqrt{a_3} - \lambda_3 \sqrt{a_M}}{\lambda_M \sqrt{a_3} + \lambda_3 \sqrt{a_M}}; \quad y = \frac{h}{2\sqrt{a\tau}}; \quad \operatorname{erfc}(y) = 1 - \operatorname{erf}(y);$$

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

Для малых значений τ 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 α , λ и c для исследуемого продукта:

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

где y и ε – некоторые безразмерные величины, которые определяются по таблицам, исходя из найденных опытных соотношений τ_2/τ_1 ; τ_1 – время, в течение которого температура на границе соприкосновения эталонного тела исследуемого образца пюре достигнет $\Delta T_1 = k_1 \cdot \Delta T$, τ_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; ΔT – разность между температурой нагревателя T_H и температурой в месте стыка исследуемого продукта и эталона T , т. е. $\Delta T = T_H - T$; ρ_M – плотность исследуемого поликомпонентного овощного пюре, кг/м³.

Определение зависимости теплофизических характеристик исследуемого поликомпонентного овощного пюре проводилось на измерительной установке Cossfield RT-1394H (National Instruments) (рис. 1).



Рис. 1. Измерительная установка для определения теплофизических характеристик овощного пюре Cossfield RT-1394H (National Instruments)

Методика проведения эксперимента включала следующие операции:

- заливку заданного объема (250 см³) исследуемого вида пюре в полусферическое углубление внешнего цилиндра установки;
- установку внутреннего цилиндра;

- включение термостата;
- приведение во вращение внешнего цилиндра измерительного устройства с заданной угловой скоростью $\omega = 0,1$ м/с, обеспечивающей создание в слое исследуемой жидкости скорости сдвига $\gamma = 2,5$ м/с;
- включение нагревателя измерительного устройства;
- регистрацию установившейся среднеинтегральной температуры в слое нагревателя измерительного устройства;
- отключение нагревателя измерительного устройства;
- регистрацию через заданный интервал времени $\Delta\tau = 10$ °С 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 применением пакета программ Lab View 7.0.

Измерительная установка для определения теплофизических характеристик исследуемого поликомпонентного овощного пюре выполнена в соответствии с функциональной схемой (рис. 2).

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 и рычажную систему 8 силовое воздействие передается на упругий элемент 1 вибросредоточного преобразователя силы, выходным сигналом которого является частота f электрического тока.

Основу измерительного устройства составляют два коаксиально расположенных цилиндра 1 и 2 (рис. 3). Внутренний цилиндр 1 из капролона при помощи подшипников 9 установлен соосно по отношению к наружному цилиндру 2 и состоит из трех коаксиальных цилиндрических слоев.

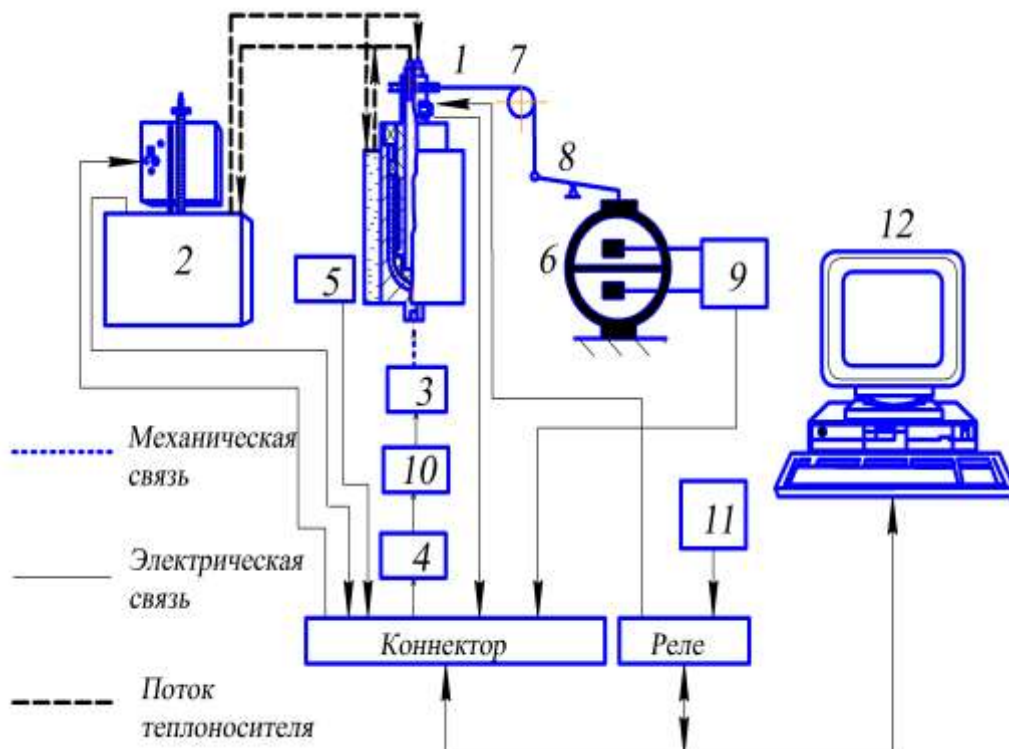


Рис. 2. Функциональная схема измерительной установки: 1 – измерительное устройство; 2 – жидкостный термостат; 3 – электродвигатель постоянного тока; 4 – усилитель мощности У-13Н; 5 – преобразователь угловой скорости вращения внешнего цилиндра; 6 – вибросредоточный преобразователь силы; 7 – трос; 8 –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

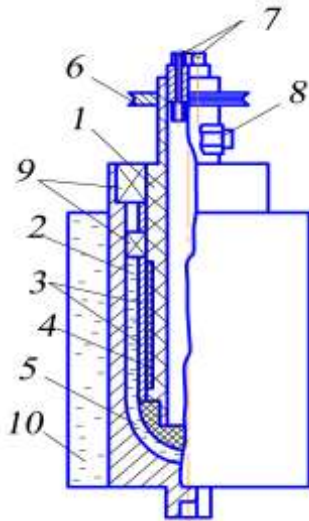


Рис. 3. Конструкция измерительного устройства: 1 – внутренний цилиндр; 2 – наружный цилиндр; 3 – нагреватель; 4 – гильза; 5 – нижний торец; 6 – шкив; 7 – спираль; 8 – разъем; 9 – подшипник; 10 – водяная рубашка

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

Выводы от 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 капролона 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 LabView 7.0.

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. 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 (m^2/c) поликомпонентного овощного пюре определяется по уравнению

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

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

Теплопроводность λ_m ($Вт/(м \cdot К)$) исследуемого образца пюре определяется по эмпирической формуле

$$\lambda_m = \lambda_3 \frac{1-h}{1+h} \sqrt{\frac{a_m}{a_3}},$$

где λ_m , a_m – теплопроводность и температуропроводность образца исследуемого пюре; $\lambda_3 = 0,184$ $Вт/(м \cdot К)$, $a_3 = 15,7 \cdot 10^{-8}$ m^2/c – теплопроводность и температуропроводность эталона; h – вспомогательная величина, определяемая по формуле

$$h = \frac{t''}{t_{гр} [1 - \Phi(z'')]} - 1,$$

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

Удельная теплоемкость поликомпонентного овощного пюре c_m ($Дж/(кг \cdot К)$) определяется по зависимости

$$c_m = \lambda_m / (a_m \rho_m),$$

где ρ_m – плотность поликомпонентного овощного пюре, $кг/м^3$.

Значения теплофизических характеристик поликомпонентного овощного пюре для диапазона температур 293...353 К приведены в таблице 1.

Управление ходом эксперимента и обработка измерительной информации осуществляется посредством виртуального прибора, разработанного в LabView 7.0 (лицевая панель прибора изображена на рис. 4).

Полученные опытные данные были обработаны на ЭВМ в среде «Microsoft Excel», в результате были получены следующие уравнения (значения теплофизических характеристик поликомпонентного овощного пюре для интервала температур 293...353 К):

при $W = 76,51\%$:

$$c = 0,947 \cdot T + 3742,6; R^2 = 0,9574$$

$$\lambda = 0,0004 \cdot T + 0,3245; R^2 = 0,9962$$

$$a = 0,0069 \cdot T + 8,0757; R^2 = 0,9968$$

при $W = 90,88\%$:

$$c = 1,2475 \cdot T + 3835,1; R^2 = 0,9884$$

$$\lambda = 0,0004 \cdot T + 0,3635; R^2 = 0,9943$$

$$a = 0,007 \cdot T + 8,6614; R^2 = 0,9965$$

где R^2 – коэффициент корреляции.

Таблица 1 - Теплофизические характеристики поликомпонентного овощного пюре

п./п.	Интервал температур	Ед. изм.	Образцы пюре	
			W~ 90,88 %	W~76,51%
			исходное	концентрированное
Коэффициент температуропроводности $a \times 10^8 \text{ м}^2/\text{с}$				
1	293	К	8,79±0,03	8,21±0,02
2	303	К	8,87±0,02	8,29±0,04
3	313	К	8,95±0,02	8,35±0,04
4	323	К	9,02±0,02	8,42±0,02
5	333	К	9,09±0,01	8,47±0,02
6	343	К	9,15±0,01	8,56±0,02
7	353	К	9,21±0,02	8,63±0,02
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)				
8	293	К	0,371±0,001	0,331±0,002
9	303	К	0,376±0,002	0,336±0,002
10	313	К	0,381±0,001	0,339±0,002
11	323	К	0,385±0,002	0,343±0,002
12	333	К	0,389±0,002	0,346±0,001
13	343	К	0,393±0,001	0,350±0,001
14	353	К	0,396±0,002	0,353±0,002
Массовая удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)				
15	293	К	3856,02±0,04	3754,89±0,04
26	303	К	3872,41±0,04	3772,03±0,04
27	313	К	3889,65±0,04	3785,17±0,02
28	323	К	3898,07±0,04	3794,91±0,04
29	333	К	3912,04±0,04	3801,02±0,04
30	343	К	3921,76±0,04	3807,09±0,04
31	353	К	3932,09±0,04	3814,62±0,02
32	Плотность ρ	кг/м ³	1073,3	1095,0

Зависимости теплофизических характеристик (коэффициентов теплопроводности λ , 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 λ , температуропроводности a и теплоемкости c), чем температура.

Анализируя полученные данные из рис. 5-7 можно сделать следующий вывод: с ростом температуры происходит увеличение теплофизических характеристик (удельная теплоемкость, теплопроводность и коэффициент температуропроводности) исследуемого поликомпонентного овощного пюре.



Рис. 4. Лицевая панель виртуального прибора, предназначенного для управления ходом эксперимента

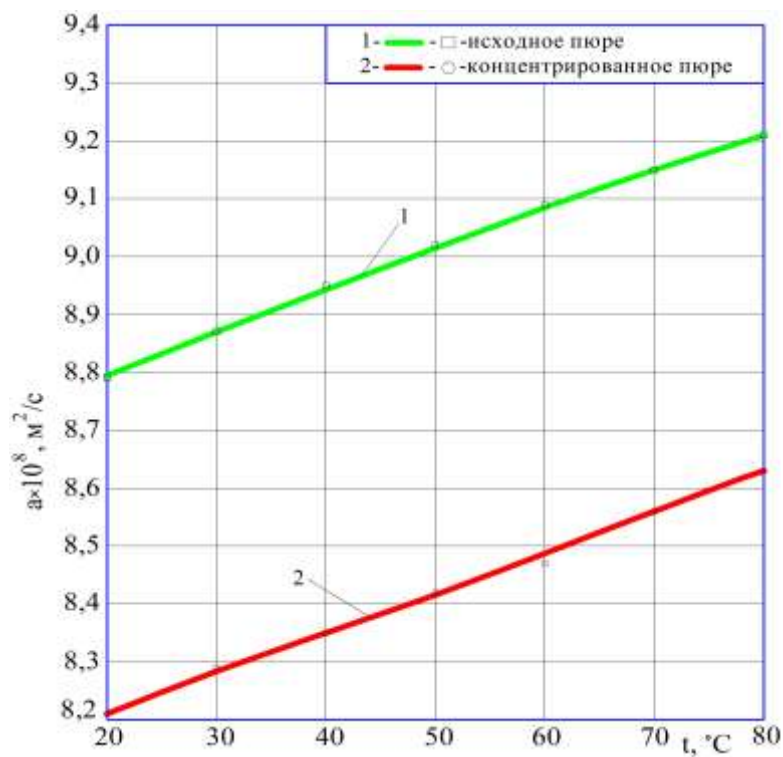


Рис. 5. Зависимость коэффициента температуропроводности поликомпонентного овощного пюре от температуры при влажности $W = 76,51\%$ и $W = 90,88\%$

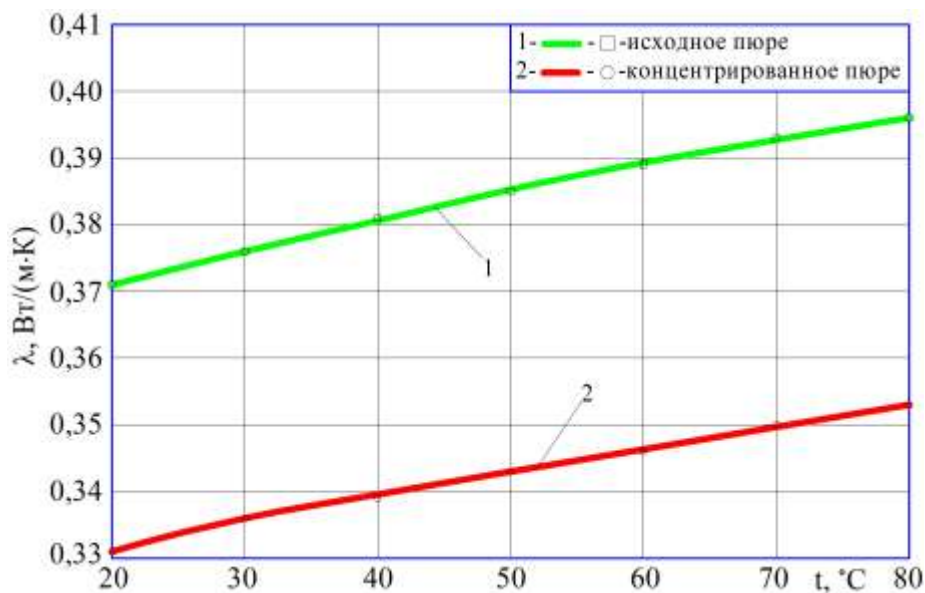


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопроводности поликомпонентного овощного пюре от температуры при влажности $W = 76,51\%$ и $W = 90,88\%$

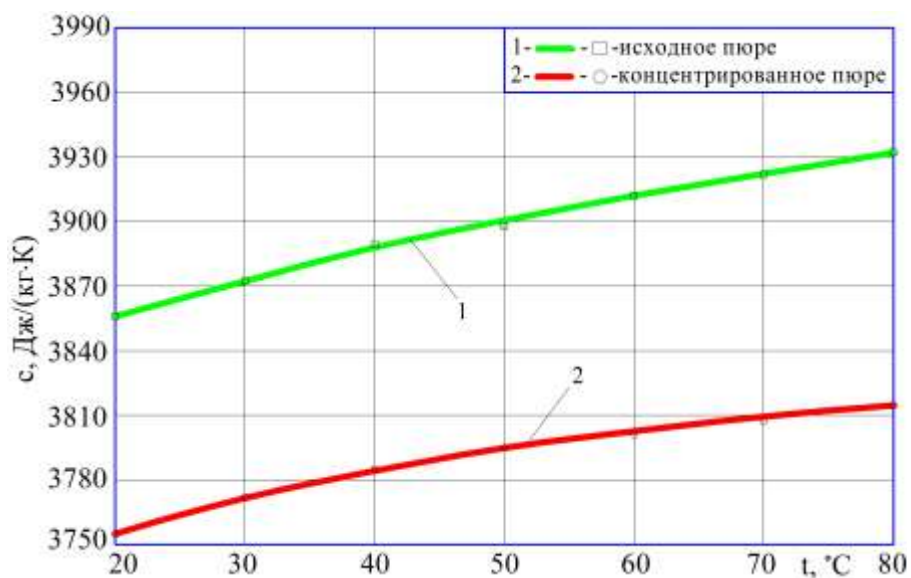


Рис. 7. Зависимость удельной теплоемкости поликомпонентного овощного пюре от температуры при влажности $W = 76,51\%$ и $W = 90,88\%$

Литература:

1 Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник. М.: Агропромиздат, 1990. 287 с.

2. Вертяков Ф. Н., Остриков А.Н. Производство концентрированных фруктовых и овощных пюре. Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. 452 с.

References:

1 Ginsburg A. S. The thermal characteristics of foods: a handbook /M.: Agropromizdat 1990. 287 p.

2. Vertyakov F.N., Ostrikov A.N. Manufacturing of concentrated fruit and vegetable purees. Orenburg: IPK SEI OSU. 2009. 452 p.