

Теплофизические свойства горького перца, высушенного СВЧ-конвективным способом при переменном теплоподводе

А.Н. Остриков, д.т.н., профессор, Р.В. Дорохин, аспирант, Воронежский ГУИТ

Научное обоснование процесса сушки горького перца невозможно без знания его теплофизических характеристик (коэффициента температуропроводности a , $\text{м}^2/\text{с}$, коэффициента теплопроводности λ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, удельной теплоёмкости c , $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

При определении теплофизических характеристик использован метод нестационарного те-

плового режима, основанный на решении задачи теплопроводности для начальной стадии процесса, а именно метод двух температурно-временных точек, разработанный В.С. Волькенштейн [1].

Определение зависимости теплофизических характеристик горького перца проводилось на измерительной установке Cossfield RT-1394H (National Instruments) (рис. 1).

Методика проведения эксперимента включала следующие операции: помещение навески заданной массы (15 г) исследуемого горького перца в

полусферическое углубление внешнего цилиндра установки; установка внутреннего цилиндра; включение термостата; регистрация установившейся среднеинтегральной температуры в слое нагревателя измерительного устройства; отключение нагревателя измерительного устройства; регистрация через заданный интервал времени $\Delta\tau = 20$ °С среднеинтегральной температуры нагревателя измерительного устройства; отключение привода внешнего цилиндра при достижении стационарной температуры; определение теплофизических характеристик исследуемого вида горького перца по экспериментальной информации с использованием расчётных соотношений, полученных в ходе решения обратной задачи теплопроводности с применением пакета программ Lab View 7.0 [2].

В процессе проведения эксперимента при определении плотности образцов горького перца заключается в том, что навеска заданной массы (15 г) исследуемого объекта помещается в полусферическое углубление внешнего цилиндра установки Cossfield RT-1394H (National Instruments), где определяется плотность исследуемого образца, удовлетворяющая условию:

$$\sum_{i=1}^{i=K} (\sigma - \rho \cdot \gamma_i^n)^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

Значения теплофизических характеристик образцов горького перца для диапазона температур 293–353 К приведены в таблице.

Температуропроводность a_m (м²/с) горького перца определяется по уравнению:

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

где x – толщина образца горького перца, м;

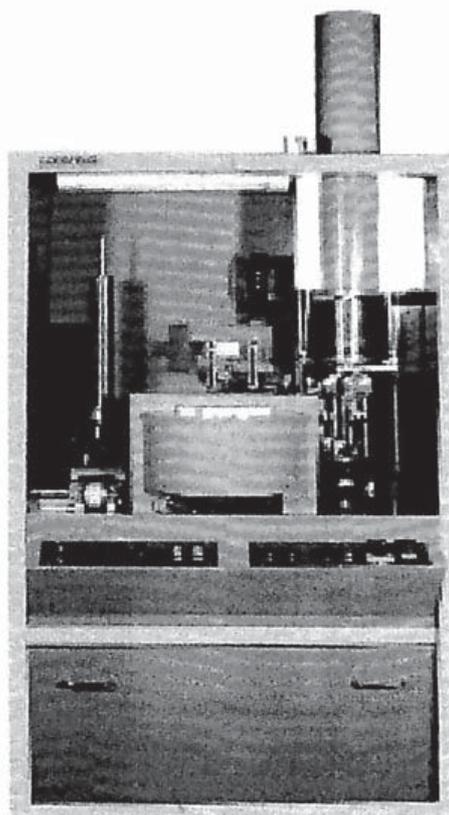


Рис. 1 – Измерительная установка для определения теплофизических характеристик Cossfield RT-1394H

z'' – интеграл Гаусса, определяемый в зависимости от отношения τ''/τ' ;
 τ'' , τ' – время изменения температуры в плоскости соприкосновения горького перца с эталоном, с [3].

Теплофизические характеристики образцов горького перца ($X \pm Sx$)

Интервал температур	Ед. изм.	Образцы перца	
		$W \sim 88,02$ %	$W \sim 9,17$ %
		исходная	после сушки
Коэффициент температуропроводности (а), $\times 10^8$ м ² /с			
20	°С	6,81±0,04	6,47±0,04
40	°С	6,87±0,04	6,53±0,04
60	°С	6,94±0,04	6,58±0,02
80	°С	6,99±0,04	6,64±0,02
Коэффициент теплопроводности (λ), Вт/(м·К)			
20	°С	0,277±0,002	0,182±0,004
40	°С	0,282±0,002	0,186±0,002
60	°С	0,287±0,002	0,190±0,002
80	°С	0,290±0,002	0,194±0,004
Массовая удельная теплоёмкость (с), Дж/(кг·К)			
20	°С	3778,15±0,05	2390,01±0,04
40	°С	3807,02±0,05	2422,52±0,04
60	°С	3838,31±0,05	2453,17±0,05
80	°С	3860,05±0,05	2487,02±0,05
Плотность (ρ)	кг/м ³	1076,4	1175,2

Теплопроводность λ_m (Вт/(м·К)) горького перца определяется по эмпирической формуле:

$$\lambda_m = \lambda_3 \frac{1-h}{1+h} \sqrt{\frac{a_m}{a_3}}, \quad (3)$$

где λ_m , a_m – теплопроводность и температуропроводность образца исследуемого горького перца;

λ_3 , a_3 – теплопроводность и температуропроводность эталона;

h – вспомогательная величина, определяемая по формуле:

$$h = \frac{t''}{t_{гр} [1 - \Phi(z'')] } - 1, \quad (4)$$

где t'' – температура в плоскости соприкосновения образца горького перца и эталона, определяемая по полученной диаграмме, °С;

$t_{гр}$ – температура греющей поверхности, °С;

$\Phi(z')$ – функция Гаусса [4].

Удельная теплоёмкость горького перца c_m (Дж/(кг·К)) определяется по зависимости:

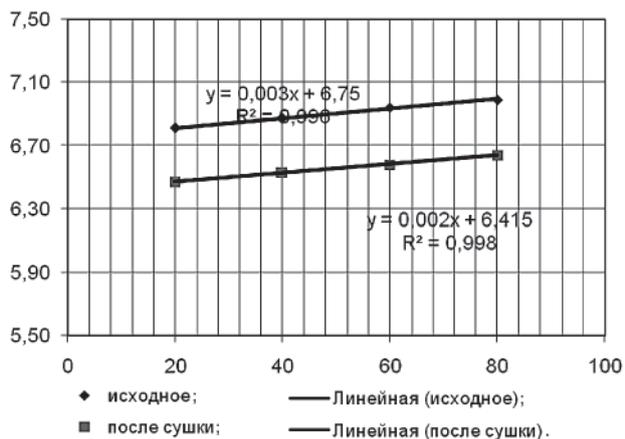


Рис. 2 – Зависимость коэффициента температуропроводности образцов горького перца от температуры при влажности $W = 88,13\%$ и $W = 9,17\%$

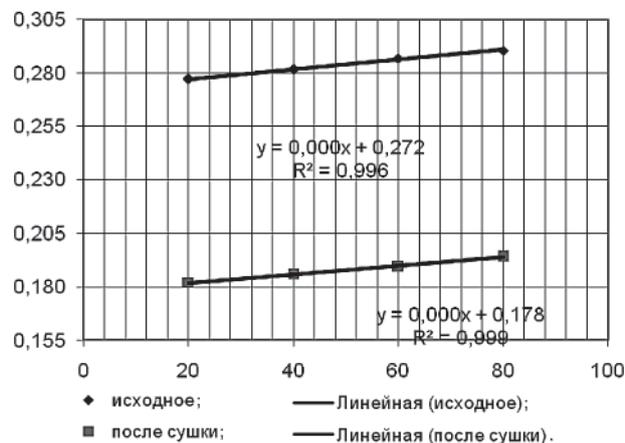


Рис. 3 – Зависимость коэффициента теплопроводности образцов горького перца от температуры при влажности $W = 88,13\%$ и $W = 9,17\%$

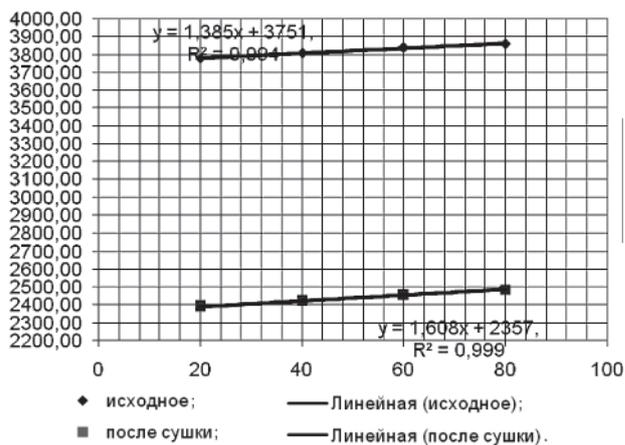


Рис. 4 – Зависимость удельной теплоёмкости образцов горького перца от температуры при влажности $W = 88,13\%$ и $W = 9,17\%$

$$c_m = \lambda_m / (a_m \rho_m), \quad (5)$$

где ρ_m – плотность горького перца, кг/м³.

Управление ходом эксперимента и обработка измерительной информации осуществляется посредством виртуального прибора, разработанного в LabView 7.0. Опытные данные были обработаны на ЭВМ в среде Microsoft Excel, в результате были получены следующие уравнения (значения теплофизических характеристик горького перца для интервала температур 293–353 К):

при $W = 88,02\%$:

$$c = 1,8786 \cdot T + 3654,3; R^2 = 0,9997,$$

$$\lambda = 0,0002 \cdot T + 0,199; R^2 = 0,9931,$$

$$a = 0,0032 \cdot T + 4,915; R^2 = 0,999$$

при $W = 9,17\%$:

$$c = 1,7555 \cdot T + 3392; R^2 = 1,$$

$$\lambda = 0,0002 \cdot T + 0,191; R^2 = 0,9931,$$

$$a = 0,0032 \cdot T + 4,755; R^2 = 0,999,$$

где R^2 – коэффициент корреляции.

Зависимости теплофизических характеристик образцов горького перца приведены на рисунках 2–4.

В результате обработки экспериментальных данных выявили, что зависимости теплофизических характеристик продукта от температуры носят линейный характер и с ростом температуры происходит увеличение теплофизических характеристик (удельная теплоёмкость, теплопроводность и коэффициент температуропроводности) исследуемых образцов горького перца.

Литература

1. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник. М.: Агропромиздат, 1990. 287 с.
2. Вышелеский А.Н., Черенков А.И. Экспериментальное определение теплопроводности некоторых пищевых продуктов // Сборник научных трудов ВНИИТоргмаша. 1960. № 7. С. 97–110.
3. Гончарова Е.И., Тягунов В.М., Иванов А.Ю. Комплексное измерение теплофизических характеристик пищевых продуктов // Известия вузов СССР. Пищевая технология. 1977. № 2. С. 148–152.
4. Латышев В.П. Метод приближённого расчёта коэффициента теплопроводности некоторых пищевых продуктов // Холодильная промышленность. 1979. № 10. С. 38–41.