

Исследование фотометрических характеристик пищевых продуктов с целью интенсификации процессов их тепловой обработки.

Вороненко Б.А., Пеленко В. В., Иваненко В. П., Долгих А.А.,
Мусаев Ф.А., Добряков А.Б., Кузьмин В.В.

Зависимость температурного поля от плотности энергии инфракрасного излучения, описывается известным [1] уравнением теплопроводности:

$$\partial T / \partial \tau = \alpha (\partial^2 T / \partial x^2) + (1/c\rho) \cdot Q(x, T) \quad (1)$$

Здесь $Q(x, T)$ представляет собой энергию излучения инфракрасного источника, поглощаемую единицей объёма материала в плоскости на глубине x , Вт/м³.

Причём:

$$Q(x, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_V(x, \lambda, T) d\lambda, \quad (2)$$

где $q_V(x, \lambda, T)$ – энергия монохроматического излучения, поглощаемая единицей объёма материала в плоскости на глубине x в единицу времени, на единице ширины интервала длин волн, Вт/(м³ мкм).

Запишем закон поглощения в виде:

$$q_A(x, \lambda, T) = A(x, \lambda, T) \cdot q_0(\lambda),$$

здесь q_0 – спектральная плотность потока излучения, проникающего в материал.

$$q_0 = q_{nao} - q_{omp} = q_{nao} (1 - R_\lambda),$$

где $q_{nao}(\lambda)$ – спектральная плотность потока, падающего на поверхность материала, рассчитанная на единицу ширины интервала длин волн спектра, Вт/(м³ мкм); $q_{omp} = q_{nao} R_\lambda$ – спектральная поглощательная способность материала как функция толщины слоя в плоскости x ; λ – длина волны; T – температура излучателя.

Тогда

$$q_V(x, \lambda, T) = \partial q_A(x, \lambda, T) / \partial x = q_0 \lambda \cdot \partial A(x, \lambda, T) / \partial x$$

$$Q(x, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_{nao}(\lambda) (\partial A(x, \lambda, T) / \partial x) d\lambda$$

Таким образом уравнение теплопроводности для одномерной задачи с дополнительным источником теплоты в форме поглощённой энергии интегрального излучения примет вид:

$$\partial T / \partial \tau = \alpha (\partial^2 T / \partial x^2) + (1/c\rho) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_{nao}(\lambda) (\partial A(x, \lambda, T) / \partial x) d\lambda \quad (3)$$

Пределы изменения λ зависят от конкретной формы спектра излучения, но по данным различных авторов находятся в достаточно чётком диапазоне:

$$(0,5 - 0,4) \cdot \lambda_{\max} \leq \lambda \leq (4,3 - 4) \cdot \lambda_{\max}$$

Для решения уравнения (3) необходимо определить спектральную поглощательную способность материала $A(x, \lambda, T)$.

Величина $A(x, \lambda, T)$ для одностороннего облучения может быть найдена по формуле В.В. Красникова и С.Г. Ильясова:

$$A(x, \lambda, T) = 1 - q_x(\lambda, T) / q_{x=0},$$

$$A(x, \lambda, T) = 1 - q_x(\lambda, T) / q_{nao} (1 - R_\lambda)$$

где $q_x(\lambda, T)$ – спектральная плотность пропущенного потока излучения (слой с координатой x , отсчитывая от поверхности материала); $q_{x=0}$ – спектральная плотность потока излучения попадающего в материал ($q_{x=0} = q_x$ при $x = 0$)

$$q_x(\lambda, T) = q_0(\lambda, T) e^{-k_\lambda x} = (1 - R_\lambda) q_{nao} \cdot e^{-k_\lambda x}$$

$$A(x, \lambda, T) = 1 - e^{-k_\lambda x}$$

Тогда уравнение (3) примет вид:

$$\partial T / \partial \tau = \alpha (\partial^2 T / \partial x^2) + (1 / c \rho) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_{nao} (1 - R_\lambda) \cdot k_\lambda \cdot e^{-k_\lambda x} d\lambda \quad (4)$$

или:

$$\partial T / \partial \tau = \alpha (\partial^2 T / \partial x^2) + (q_{nao} (1 - R_\lambda) \cdot k_\lambda \cdot e^{-k_\lambda x} / c \rho) (\lambda_2 - \lambda_1)$$

учитывая, что $q_{nao} = I_0 / \Delta \lambda = I_0 / (\lambda_2 - \lambda_1)$

Окончательно получаем:

$$\partial T / \partial \tau = \alpha (\partial^2 T / \partial x^2) + (I_0 (1 - R_\lambda) k_\lambda e^{-k_\lambda x} / \rho c) \quad (5)$$

Как видно из уравнения (5), для его решения необходимо экспериментально определить отражательную R_λ способность материала и коэффициент поглощения k_λ .

В рамках сформулированной задачи были разработаны экспериментальные установки, схемы которых приведены на рисунках 1 и 2, позволившие получить необходимые расчётные исходные данные. Результаты экспериментальных исследований фотометрических характеристик ламинарии приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Экспериментальные данные по оптической проницаемости ламинарии для $\lambda_{\max}=1,05\mu\text{м}$.

Плотность потока I_o , Вт/м ²	Толщина слоя x , мм	Ток термостолбика i_{mc} , мА	Диаметр диафрагмы d , мм	Плотность потока I_x , Вт/м ²	Проницаемость $\Pi = I_x/I_o$, %
120	0	0,21	9,3	190	100
	0,6	0,057		135	27
	1,5	0,047		115	22
	2,1	0,035		95	17
	3,4	0,03		75	14
600	0	0,26	9,3	600	100
	0,6	0,07		165	27
	1,5	0,056		130	22
	2,1	0,042		105	17
	3,4	0,04		100	16,5
800	0	0,34	9,3	800	100
	0,6	0,1		235	24
	1,5	0,075		175	22
	2,1	0,065		158	20
	3,4	0,055		130	16

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований отражательной способности ламинарии для $\lambda_{\max}=1,05\mu\text{м}$

№ п/п	Материал	Показания прибора, В
1	Чёрная бумага	0,025
2	Белая бумага	0,85
3	Алюминий полированный	6
4	Золото шероховатое	6
5	Морская капуста сухая(сушёная)	0,55
6	Морская капуста сырая с сухой поверхностью	0,55
7	Морская капуста сырая с влажной поверхностью	4,5

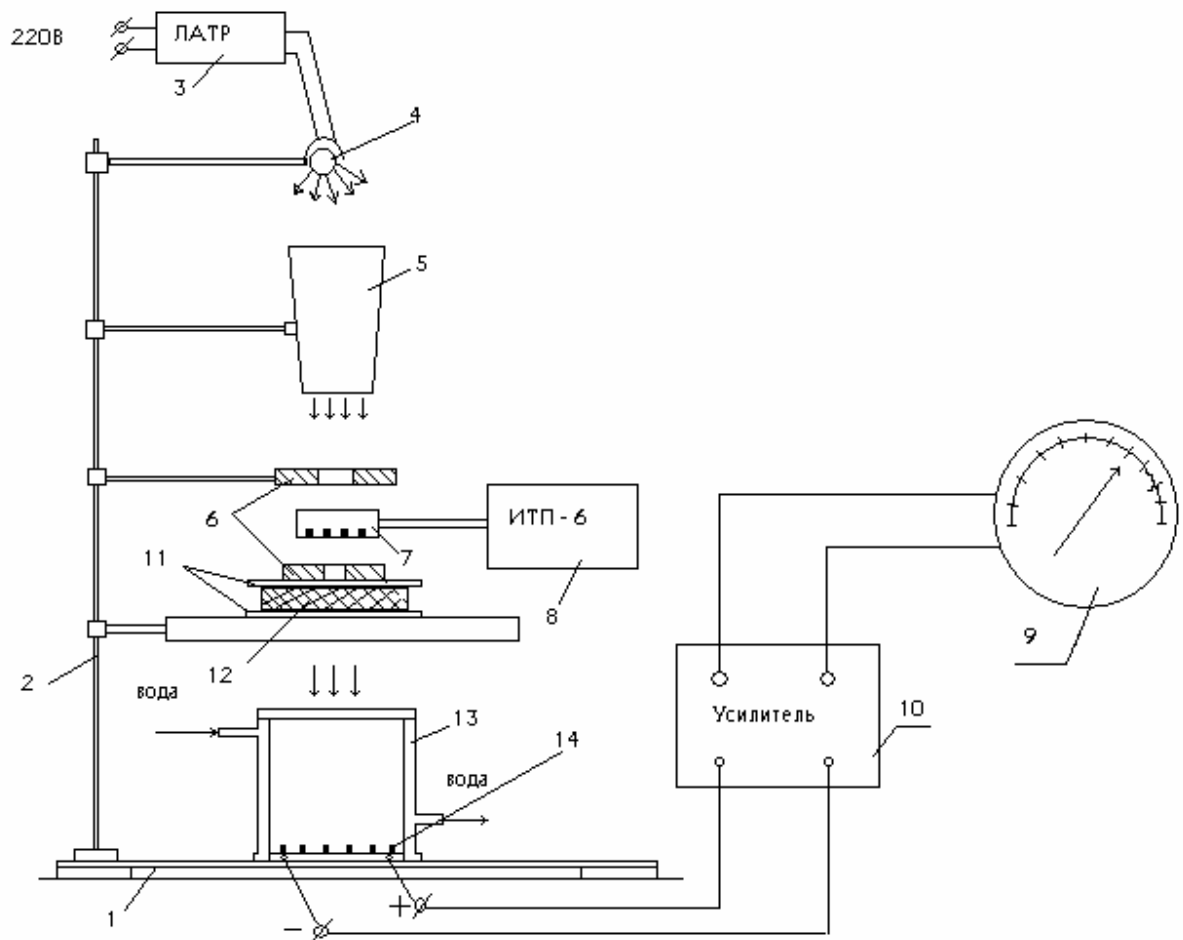


Рис. 1 Установка для определения оптической прозрачности пищевых материалов (коэффициент пропускания).

1 – основание; 2 – стойка; 3 – регулятор напряжения; 4 – источник излучения (лампа ЗС – 150); 5 – конфузор; 6 – диафрагмы; 7 – датчик; 8 – измеритель плотности теплового потока (ИТП – 6); 9 – показывающий прибор (микроамперметр 14136); 10 – усилитель аналогового сигнала; 11 – стеклянные пластины; 12 – образец; 13 – радиометр (фотометр); 14 – термостолбик (батарея термопар).

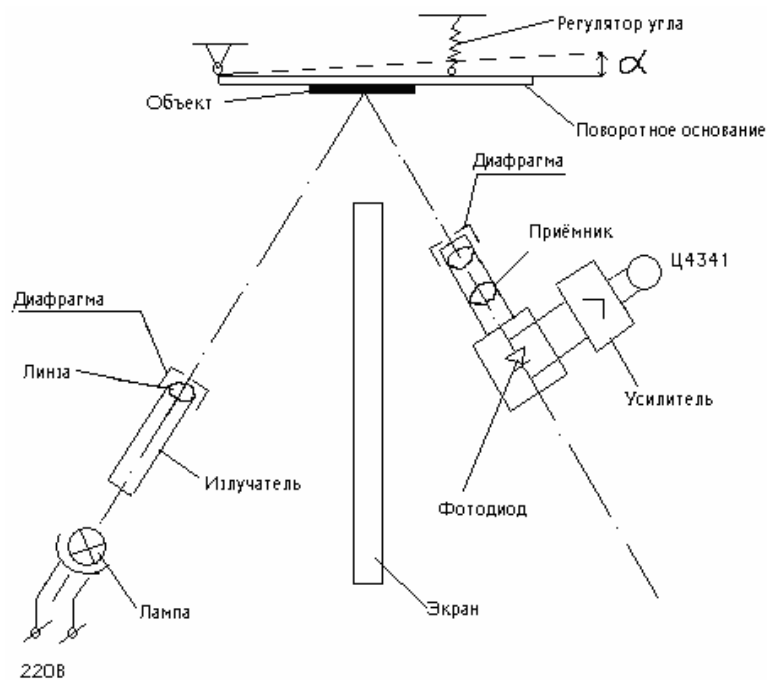


Рис.2 Установка для определения коэффициента отражения материала (отражательной способности).

В результате обработки экспериментальных данных получены оптические характеристики ламинарии:

$$k_{\lambda} = 2,5 \text{ м}^{-1}$$

$$R_{\lambda} = 0,09$$

Список литературы:

1. А.С. Гинзбург. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: «Пищевая промышленность», 1973 – 528с.
2. И.А. Рогов, А.В. Горбатов. Физические методы обработки пищевых продуктов. М.: «Пищевая промышленность», 1974 – 583с.
3. П.М. Тиходеев. Световое измерение в светотехнике. 2 изд. М.: 1962.
4. М.И. Эпштейн. Измерения оптического излучения в электронике. М.; 1990.