

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ФОТОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В работе рассмотрена возможность определения теплофизических характеристик пищевых продуктов методом лазерной фотоакустической спектроскопии. Предложен способ определения коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости яблочно-пектинового пюре фотоакустическим методом.

The article analyses the possibility of determining thermal characteristics of foodstuff with laser photoacoustic spectroscopy method. It offers the way how to identify the thermal conductivity and specific heat of apple-pectin purée with the photoacoustic method.

Ключевые слова: фотоакустическая спектроскопия; фотоакустическая ячейка; коэффициент теплопроводности; удельная теплоемкость; бesselев световой пучок; поликомпонентное пюре; пектиновые вещества; яблочно-пектиновое пюре.

Key words: photoacoustic spectroscopy; photoacoustic cell; thermal conductivity; specific heat; Bessel light beam; multicomponent purée; pectin substances; apple-pectin purée.

Введение

Разработке методов исследования теплофизических характеристик пищевых продуктов в последнее время уделяется пристальное внимание [1–3]. Выбор рациональных режимов процесса концентрирования плодовоовощных пюре требует знания характера изменений основных теплофизических параметров исследуемых образцов, таких как коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, удельной теплоемкости [1; 3]. Использование метода двух температурно-временных точек позволило авторам получить уравнение температурной зависимости теплофизических характеристик поликомпонентного овощного пюре в интервале температур 293–353 °К [2]. Анализ данных в [1; 3] позволил сделать вывод о линейной зависимости основных теплофизических характеристик от роста температуры.

Следует отметить, что аналитические методики определения теплофизических характеристик пищевых продуктов, а также многокомпонентных, гетерогенных, полидисперсных систем традиционными методами хорошо разработаны и изложены, например, в [4; 5].

Использование лазерных источников излучения способствовало развитию альтернативных способов исследования теплофизических свойств пространственно неоднородных сред, к которым в большинстве своем относятся продукты питания. Одним из эффективных бесконтактных является метод лазерной фотоакустической спектроскопии [6–8].

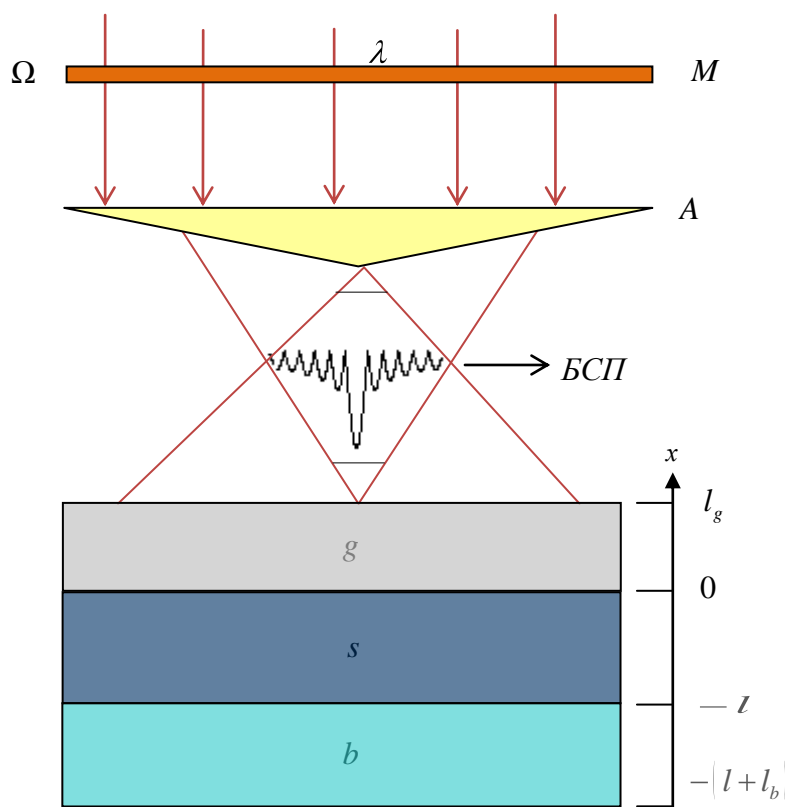
Суть метода заключается в следующем. Исследуемый образец пищевой продукции помещается в акустически замкнутую фотоакустическую ячейку, содержащую нетеплопроводящую подложку и детекторный газ, соединенный с конденсорным микрофоном [5; 7]. Образец облучается импульсным или гармонически амплитудно-модулированным лазерным излучением. Вследствие поглощения в образце возникают термоупругие колебания и далее модулированный на звуковой частоте поток тепла передается в газовую область ячейки, где высокочувствительным микрофоном регистрируется переменная во времени составляющая давления детекторного газа, преобразующаяся далее в электрический сигнал.

В качестве исследуемого образца выберем пюре из сульфитированных выжимок яблок. Как известно, яблочно-пектиновое пюре представляет собой оптимальный вариант замены в рецептуре

фруктовой начинки яблочного пюре на яблочно-пектиновое в количестве 80–90%, что позволяет обеспечить термостабильные свойства яблочной начинки, а также добиться высоких органолептических и физико-технологических показателей качества готового изделия в соответствии с СТБ 760-2003 [9–11].

Пектиновые вещества являются органическими соединениями-полисахаридами и содержатся в различных количествах в плодах, овощах. Химические свойства и механизмы действия пектинов на процессы, связанные с очищением живых организмов от радионуклидов и тяжелых металлов, отмечались в [12].

Пусть на неоднородный образец яблочно-пектинового пюре, помещенного в фотоакустическую ячейку, падает бесселевый световой пучок (БСП) с частотой амплитудной модуляции Ω (что отображено на нижеприведенном рисунке). Использование БСП определяется рядом его уникальных свойств [13; 14]. Например, такими свойствами, как бездифракционность при распространении в определенной области пространства, способность высокой концентрации световой энергии вблизи оси пучка, а также возможность управления выбором необходимых поляризационных мод БСП, за счет управляемого изменения угла конусности светового пучка [15; 16]. Последнее обстоятельство, как отмечалось в [17; 18], весьма существенно сказывается на изменении скорости диссипации энергии поляризационных мод БСП и распределении температурного поля в исследуемом образце, которое непосредственно влияет на процесс формирования фотоакустического сигнала.



Условные обозначения:

M – модулятор; A – аксикон; $БСП$ – бесселевый световой пучок; s – исследуемый образец яблочно-пектинового пюре; g – детекторный газ; b – подложка; λ – длина волны падающего излучения; l – длина образца; l_g – длина столба детекторного газа; l_b – толщина нетеплопроводящей подложки

Схема газомикрофонной регистрации фотоакустического сигнала

Распределение температурного поля вследствие модулированного на частоте поглощения исследуемым образцом излучения будет описываться следующей системой уравнений теплопроводности (рассматривается одномерная модель) [8]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\beta_g} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad 0 \leq x \leq l_g, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\beta_s} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{2k_s} \cdot Q^{TE} (1 + e^{i\Omega}), \quad 1 \leq x \leq 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\beta_b} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad -l - l_b \leq x \leq -l, \quad (3)$$

где Q^{TE} – скорость диссипации энергии TE -моды БСП в исследуемом образце, определяемая соотношением, которое следует из [17; 18] в пренебрежении параметрами пространственной дисперсии (сравни с [13]);

$$Q^{TE} = \frac{I_0 \varepsilon_0 c}{4\pi} k_0 [n'^2 + n''^2] \cdot \left[\left(\frac{m}{q\rho} \right)^2 J_m^2(q\rho) + J_m'^2(q\rho) \right] \exp(-\alpha x), \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность падающего пучка;

$J_m(q\rho)$ – функция Бесселя первого рода m -го порядка;

$J_m'(q\rho)$ – производная по радиальной координате ρ от функции Бесселя;

m – порядок моды БСП;

c – скорость света в вакууме;

$k_x = k'_x + ik''_x = k_0 \sqrt{\varepsilon} \cos \alpha_0$, $\varepsilon_0 = \varepsilon'_0 + i\varepsilon''_0$ – комплексная диэлектрическая проницаемость, связанная

с показателем преломления среды как $\varepsilon_0 = \sqrt{n}$, $n = n' + in''$, $k_0 = \frac{\omega}{c}$, $\alpha = 2k''_x$ – коэффициент

поглощения, $q = k_0 \cos \alpha_0$, α_0 – параметр конусности, равный половине угла при вершине конуса волновых векторов, определяющий спектр пространственных частот пучка.

В формулах (1)–(3) также использованы следующие обозначения: β_i – коэффициент температуропроводности, связанный с коэффициентом теплопроводности k_i соотношением $\beta_i = k_i / \rho_i C_i$,

ρ_i – плотность, C_i – удельная теплоемкость, индекс i принимает значения s, q, b соответственно для исследуемого образца, детекторного газа и нетеплопроводящей подложки.

Основываясь на решении системы уравнений теплопроводности (1)–(3) с учетом (4) и исходя из требований стандартных условий непрерывности температуры и градиентов температурных потоков на границах фотоакустической ячейки, несложно получить выражения для амплитуды фотоакустического сигнала.

Так как общее выражение достаточно громоздкое, то ограничились частным случаем оптически непрозрачного и термически толстого образца. Когда толщина образца l больше глубины поглощения света μ_a , которая, в свою очередь, меньше длины термодиффузии μ_s , тогда справедливо соотношение (сравни с [7; 8])

$$q^{TE} = \frac{(1-i)Q^{TE}}{2a_g} \left(\frac{\mu_s}{k_s} \right) \cdot Y, \quad (5)$$

где $Y = \gamma_0 \frac{P_0}{2\sqrt{2T_0}l_g}$;

P_0, T_0 – начальное давление и температура детекторного газа;

γ_0 – показатель адиабаты;

l_g – длина столба детекторного газа;

$a_g = \mu_g^{-1}$ – коэффициент термодиффузии в газе;

$\mu_s = \sqrt{\frac{2\beta_g}{\Omega}}$ – длина термической диффузии образца;

k_s – коэффициент температуропроводности образца.

Как следует из (5), величина фотоакустического сигнала не зависит от коэффициента поглощения α и определяется, в основном, тепловыми свойствами исследуемого образца. Преобразовав соотношение (5) относительно коэффициента теплопроводности образца, получим выражение

$$k_s = (\mu_g Y)^2 (Q^{TE})^2 \frac{\Omega^{-1}}{(\rho_s C_s)} \frac{1}{(q^{TE})^2}. \quad (6)$$

Экспериментальное измерение амплитуды фотоакустического сигнала позволяет на основе (6) определить коэффициент теплопроводности яблочно-пектинового пюре k_s и его удельную теплопроводность C_s , считая ρ_s известной [9]. Измерение q^{TE} необходимо выполнить для двух различных углов конусности $\alpha_{1,2}$, которые входят в Q^{TE} , что приведет к системе двух уравнений относительно двух определяемых величин k_s и C_s . При этом частоту модуляции Ω падающего излучения не следует изменять, чтобы не выйти за пределы рассматриваемого частного случая (5) оптически непрозрачного и термически толстого образца.

Заключение

Таким образом, в работе предложен способ определения основных теплофизических характеристик пространственно неоднородного образца (яблочно-пектинового пюре) методом лазерной фотоакустической спектроскопии.

Список использованной литературы

1. **Изменение** теплофизических характеристик овощного пюре в процессе двухстадийного выпаривания / А. Н. Остриков [и др.] // Вестн. ОГУ. – 2012. – № 1. – С. 233–238.
2. **Короткий, И. А.** Применение метода двух температурно-временных интервалов для определения теплофизических характеристик твердых, жидких и сыпучих материалов / И. А. Короткий // Техника и технология пищевых пр-в. – 2009. – № 2. – С. 465–469.
3. **Остриков, А. Н.** Исследование изменений теплофизических характеристик поликомпонентного овощного пюре / А. Н. Остриков, А. В. Трущечкин // Техника и технология пищевых пр-в. – 2012. – № 1. – С. 233–238.
4. **Гинзбург, А. С.** Теплофизические характеристики пищевых продуктов : справ. / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовский. – М. : Агропромиздат, 1990. – 287 с.
5. **Валькенштейн, В. С.** Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов / В. С. Валькенштейн. – Л. : Энергия, 1971. – 145 с.
6. **Жаров, В. П.** Лазерная оптико-акустическая спектроскопия / В. П. Жаров, В. С. Летохов. – М. : Наука, 1980. – 21 с.
7. **Rosencwaig, A.** Photoacoustic and photoacoustics spectroscopy / A. Rosencwaig. – N.-Y., 1980. – 309 p.
8. **Mityurich, G. S.** Modern photoacoustic spectroscopy problems. Theory and experiment / G. S. Mityurich, J. Motylewski, J. Rahachowski // IFPT. Polish Academy of Science, Warszawa. – 1993. – № 41. – 164 p.
9. **Василенко, З. В.** Исследование влияния яблочно-пектинового пюре на свойства яблочной начинки / З. В. Василенко, А. Е. Жидкова // Хлебопек. – 2011. – № 4. – С. 20–23.
10. **Донченко, Л. В.** Технология пектина и пектинопродуктов : учеб. пособие / Л. В. Донченко. – М. : ДеЛи, 2000. – 256 с.
11. **Полуфабрикаты** плодовые, ягодные и овощные. Общие технические условия : СТБ 760–2003. – Взамен СТБ 760–94 ; введ. 01.09.2003. – Минск : Госстандарт, 2003. – 7 с.
12. **Нестеренко, В. Б.** Радиационный мониторинг жителей и их продуктов питания в Чернобыльской зоне Беларуси / В. Б. Нестеренко // Информ. бюл. / Ин-т радиац. безопасности. – Минск, 2002. – № 21. – С. 100–102. – (Серия «Чернобыльская катастрофа»).
13. **Особенности** распределения потоков энергии при распространении квазибездифракционных световых пучков в поглощающих средах / В. Н. Белый [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 3. – С. 7–14.
14. **Белый, В. Н.** Преобразования частоты бесселевых световых пучков нелинейными кристаллами / В. Н. Белый, Н. С. Казак, Н. А. Хило // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30, № 9. – С. 753–766.
15. **Лепарский, В. Е.** Электрооптические конические линзы для формирования бесселевых световых пучков / В. Е. Лепарский, А. Г. Машенко // Изв. Гом. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2001. – № 6. – С. 8–10.

16. **Устройство** термооптического возбуждения акустических волн : пат. U 5969 Респ. Беларусь, МПК [G10K 11/00](#) / П. И. Ропот, Г. С. Митюрин ; заявл. 27.07.09 ; опубл. 28.02.10 // Афiц. бюл. / Нац. цнтр iнтэллектуал. уласнасцi Рэсп. Беларусь. – 2010. – № 1. – С. 215.

17. **Фотоакустическое** преобразование бesselевых световых пучков в магнитоактивных сверхрешетках / Г. С. Митюрин [и др.] // Кристаллография. –2015. – Т. 60, № 52. – С. 273–277.

18. **Митюрин, Г. С.** Фотодефлекционная спектроскопия магнитоактивных сверхрешеток, облучаемых бessel-гауссовыми световыми пучками / Г. С. Митюрин, Е. В. Черненко, А. Н. Сердюков // Журн. прикладной спектроскопии. – 2015. – Т. 82, № 2. – С. 255–259.

Получено 24.06.2015 г.