

Література

1. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой. Москва: Химия, 1980. –248 с.
2. Патент на винахід №89307 України C12G 3/00, G01N 25/18 „Спосіб визначення коефіцієнта дифузії зв'язаної речовини в капілярно-пористих матеріалах”/ Нікітенко М.І., Снежкін Ю.Ф., Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М. Заявл. 17.06.2008; Опубл. 11.01.2010; Бюл. № 1
3. Никитенко Н. И. Теория тепломассопереноса. –Киев: Наук. думка. –1983. –352 с.
4. Никитенко Н. И. Сопряженные и обратные задачи тепломассопереноса. – Киев: Наук. думка. –1988. – 240 с.
5. Никитенко Н. И. Принцип дискретного совмещения в некорректно поставленных задачах тепло- и массопереноса // Доп.НАН України. –1995. –№ 3. –С. 54–56.
6. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности. – Киев: Наук. Думка.– 2002. Т 1. – 407с.
7. Никитенко Н.И. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидкких средах // ИФЖ. –2000. –Т. 73, –№ 4. –С. 851–860.

УДК 664.834.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ СВЧ-ПОЛЯ ПО ТЕМПУ НАГРЕВА МОДЕЛЬНОГО ТЕЛА

**Погожих Н.И. д-р техн. наук, профессор, Потапов В.А. д-р техн. наук, доцент,
Цуркан Н.М. канд. техн. наук, доцент, Гриценко О.Ю. магістр
Харківський державний університет підприємства та торгівлі, г. Харків**

Рассмотрен вопрос определения напряженности электромагнитного поля для различной нагрузки СВЧ-камеры на основе калориметрических измерений для модельных объектов разной геометрической формы.

The question of determinations of the electromagnetic field for the different loading of MV-chamber is considered on the basis of the calorimetry measurings for the model objects of different geometrical form.

Ключевые слова: термодинамическая система, напряженность СВЧ-поля, калориметрические измерения, темп нагрева.

Процессы сушки разнообразных материалов являются достаточно энергозатратными во всех промышленных отраслях. В значительной мере это касается и пищевой промышленности, поэтому определение путей повышения энергоэффективности соответствующих технологических процессов в пищевой промышленности является приоритетной проблемой для отраслевой науки. Одним из перспективных научных направлений есть применение в процессах сушки пищевого сырья СВЧ-энергии.

Данная работа проведена в рамках научной концепции, в соответствии с которой процесс сушки представляет собой эволюцию определенной термодинамической системы от некоторого начального неравновесного состояния, через максимум свободной энергии к состоянию равновесия, которое отвечает окончанию процесса [1]. При этом на пути управляемой эволюции система испытывает определенное тепловое или механическое влияние, а также их комплексное действие. Одним из видов влияния на термодинамическую систему есть действие силового СВЧ-поля в виде теплоты, в которую превращается часть его энергии в диэлектрическом материале. Соответственно, поиск энергоэффективных путей реализации процессов сушки с использованием СВЧ-энергии нуждается в теоретическом и экспериментальном моделировании тепломассообмена в определенной термодинамической системе, которую представляет собой обезвоживаемый материал.

Теоретические и экспериментальные исследования СВЧ-нагрева разнообразных диэлектрических материалов на протяжении уже нескольких десятилетий свидетельствуют о том, что, хотя теория СВЧ-нагрева диэлектрических материалов достаточно развита, практическая ее реализация нуждается в индивидуальном подходе в каждом конкретном случае. Это связано как с характеристиками самого объекта, так и с характеристиками СВЧ-поля для определенного аппаратурного решения [2].

Для выяснения механизмов воздействия электромагнитного поля (ЭЛМП) на нанообъекты, к которым относятся микрокапилляры пищевого сырья, необходимо знание его параметров, по-крайней мере, оценки их средних значений в сырье. Косвенным методом определения основной силовой характеристики

ки – напряженности электрического поля могут служить теплофизические измерения в процессе СВЧ-нагревания. В работе [3] предложено использовать метод регулярного режима для определения электро- и теплофизических характеристик дисперсных систем, однако эта метод работает только для тел правильной формы, при условии, что число Фурье ($Fo > 0,3$), а также выделяемая СВЧ-мощность в объеме тела распределена по заранее известному закону.

В общем случае задача определения напряженности СВЧ-поля в объекте, подвергаемом нагреву достаточно сложна, поскольку требует совместного решения уравнений переноса теплоты и энергии электромагнитного поля. Особенные трудности возникают при решении последней задачи в многомодовом СВЧ-резонаторе, к которым относятся микроволновые печи.

В связи с этим предлагается решение более простой задачи о кинетике СВЧ-нагрева для средних по объему значений температуры и напряженности ЭЛМП. Для этого воспользуемся общим подходом к решению задач кинетики переноса [4].

В интегральном виде закон сохранения энергии при СВЧ-нагреве тела произвольной геометрической формы имеет вид:

$$\int_V c\rho \frac{dT}{d\tau} dV = \oint_S j dS + \int_V \omega dV, \quad (1)$$

где c - удельная теплоемкость, ρ - плотность материала, j - плотность теплового потока через заданную поверхность, ω - плотность внутренних источников теплоты

$$\omega = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2, \quad (2)$$

где f - частота СВЧ-поля, ϵ_0 - электрическая постоянная, ϵ'' - мнимая диэлектрическая проницаемость, E - напряженность СВЧ-поля на поверхности тела.

Предполагая, что физические характеристики тела не изменяются в процессе СВЧ-нагрева (что является аксиомой для задач кинетики), после выполнения интегрирования в (1), получаем

$$c\rho \frac{d\bar{T}}{d\tau} = -\frac{\bar{j}}{R_V} + \bar{\omega}, \quad (3)$$

где все переменные имеют смысл средних значений по объему или поверхности, R_V - отношение объема к площади поверхности тела.

Средний тепловой поток на поверхности тела равен

$$\bar{j} = \frac{\lambda}{R_V} (T_c - T_s), \quad (4)$$

где T_c, T_s - температура в центре и на его поверхности соответственно.

Среднюю по объему температуру тела определим следующим образом

$$\bar{T} = \frac{T_c + T_s}{2} \quad (5)$$

Воспользуемся граничными условиями для теплообмена 3-го рода

$$\frac{\lambda}{R_V} (T_c - T_s) - \bar{\omega} R_V = \alpha (T_s - T_0), \quad (6)$$

где T_0 - температура окружающей тело среды, α - коэффициент теплообмена, λ - коэффициент теплопроводности.

Выражая температуры T_c, T_s из выражений (5), (6) через среднюю по объему температуру тела и температуру окружающей среды, с учетом (4) получаем на основании (3) дифференциальное уравнение кинетики СВЧ-нагревания

$$c\rho \frac{d\bar{T}}{d\tau} = -2\alpha \frac{\bar{T} - T_0}{R_V(2+Bi)} + \frac{4+Bi}{2+Bi} \bar{\omega} \quad (7)$$

где $Bi = \alpha R_V / \lambda$ – критерий Био.

Решение уравнения (7) при начальном условии $T(0) = T_0$ имеет вид

$$\bar{T} = T_0 + \frac{(4+Bi)R_V}{2\alpha} \bar{\omega} \cdot \left[1 - \exp \left(-\frac{\alpha}{c\rho R_V} \frac{2}{2+Bi} \tau \right) \right]. \quad (8)$$

На основании (8) максимальный темп нагрева при малых временах нагревания ($\Delta\tau \rightarrow 0$) равен

$$\frac{d\bar{T}}{d\tau} = \frac{4+Bi}{2+Bi} \cdot \frac{\bar{\omega}}{c\rho} \quad (9)$$

Уравнение (9) позволяет по начальному темпу нагревания тела определить среднеобъемное значение плотности внутренних источников теплоты, если знать характер зависимости этой величины от геометрии тела. Как уже отмечалось решение задачи о распределении напряженности ЭЛМП в многомодовом резонаторе для тела произвольной формы практически невозможно. Поэтому используем для определения характера этой зависимости эмпирический подход. В любом случае поглощаемая энергия поля уменьшается от поверхности тела к его центру приблизительно по закону экспоненты

$$\bar{E}^2 = \bar{E}_0^2 \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \quad (10)$$

где δ - глубина проникновения СВЧ-поля, x - расстояние от поверхности тела.

С учетом этого, неизвестную зависимость плотности внутренних источников нагревания от объема тела будем искать в виде

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_0 \exp\left(-\frac{V}{V_0}\right)^n \quad (11)$$

где показатель степени n учитывает конкретный характер изменения ЭЛМП в данном резонаторе, а постоянная V_0 имеет смысл некого объема, при котором плотность внутренних источников нагревания уменьшается в e раз по сравнению со значением $\bar{\omega}_0$ при минимальной загрузке данного резонатора.

С учетом этого регрессионное уравнение для анализа экспериментальных данных темпа нагрева от объема тела в СВЧ-камере принимает вид

$$\frac{d\bar{T}}{d\tau} = \frac{4 + \text{Bi}}{2 + \text{Bi}} \cdot \frac{\bar{\omega}_0}{c\rho} \exp\left(-\frac{V}{V_0}\right)^n \quad (12)$$

В этом уравнении теплофизические характеристики задавались, число Би рассчитывалось для случая тепловых потерь при естественной конвекции, а определяемыми величинами были $\bar{\omega}_0$, V_0 и n .

В экспериментальной части исследований для подтверждения полученной теоретической модели изучалась зависимость темпа нагревания, как функция формы и объема тела, размещенного в СВЧ-камере. Измерения проводились на серийной бытовой СВЧ-печи объемом 15 л. Как эталонное вещество использовалось вода комнатной температуры (20...21 °C).

Водой наполняли емкости разной формы и объема, изготовленные из материалов с малой величиной диэлектрической проницаемости (химическое стекло, полипропилен). С помощью термопары измеряли начальную среднеобъемную температуру опытного образца T_0 (после предварительного перемешивания). Емкость размещали в СВЧ-камере и включали генератор (при условии фиксированного уровня мощности) на определенное время ($\Delta\tau = 5...10$ с). После этого опять измеряли температуру образца T и определяли разницу конечной и начальной температуры $\Delta T = T - T_0$. Таким образом, непосредственно из эксперимента получали значение темпа нагрева образца $\Delta T/\Delta\tau$, которое потом использовалось для определения характера зависимости плотности внутренних источников тепла от объема образца по формуле (12). Окончательное значение темпа нагрева для данного образца получали после усреднения данных десятикратного повторения измерений.

В соответствии с полученными экспериментальными данными была рассчитана средняя напряженность СВЧ-поля в образце по следующей формуле:

$$E = \sqrt{\frac{\bar{\omega}}{2\pi\epsilon_0\epsilon''}} \quad (13)$$

На рис. 1 показана полученная зависимость средней напряженности поля от объема образца. Сплошной линией показана аппроксимированная кривая. В виде точек – значения, полученные на основании всех серий экспериментов. Как видно из рисунка полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с предложенной теоретической моделью.

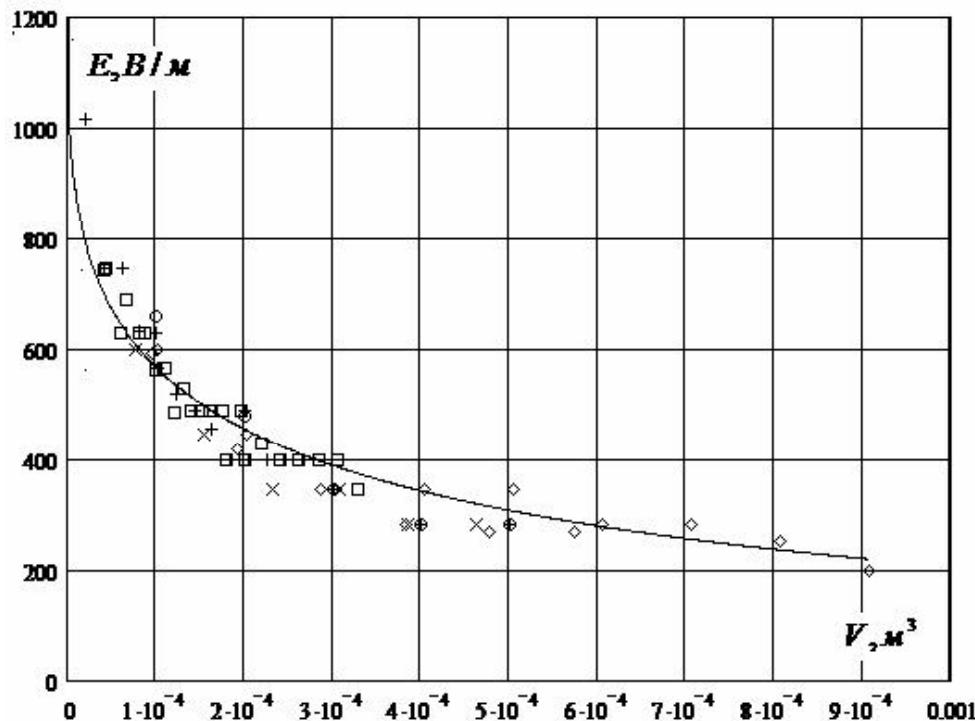


Рисунок 1 – Залежність середньої напруженості СВЧ- поля в образці від його об'єму

Выводы

Таким образом, на основании полученных теоретических зависимостей разработана методика определения напряженности СВЧ-поля, которая позволяет в дальнейшем задавать оптимальные параметры поля в процессах сушки с использованием СВЧ-энергии, что в свою очередь позволяет реализовать процесс с максимальной энергоэффективностью для конкретного объекта сушки.

Литература

- Погожих, Н. И. Научные основы теории и техники сушки пищевого сырья в массообменных модулях [Текст] : дис. доктора техн. наук ;, 05.18.12 : защищена 04.06.02 : утв. 15.10.02 / Погожих Н. И. – Х., 2002. – 212 с.
- Браун, В. Диэлектрики [Текст] / В. Браун - М. : Ин. лит., 1961. – 326 с.
- Калинин, Л.Г. Применение метода регулярного режима для определения электро- и теплофизических характеристик дисперсных систем// Наук. праці. Од. націонал. акад. харчових технологій. – Одесса: 2010. – Вип. 37. – с. 170-173.
- Потапов В.А.. Кинетика сушки: анализ и управление процессом/ В.А. Потапов: монография – Х.: ХДУХТ, 2009. – 250 с.