

DOI 10.15589/jnn20150504
УДК 536.2/537
Б86

ENERGY EFFICIENCY OF THERMAL EFFECT OF THE INTERACTION OF DIELECTRIC MATERIALS WITH A MICROWAVE FIELD

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С МИКРОВОЛНОВЫМ ПОЛЕМ

Irina L. Boshkova
ira_boshkova@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5989-9223

И. Л. Бошкова,
докт. техн. наук, доц.

Odessa National Academy of Food Technologies

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Abstract. The heating of dielectric materials in the microwave electromagnetic field on the basis of experimental data is studied. Features of energy conversion of the microwave field in the internal energy of the material is determined. In processing an example buckwheat shown that the efficiency of the microwave chamber depends not only on the mass of the load, but also on the ratio of layer thickness and exposed surface area of the sample. The equations to calculate the electric field and the specific heat of the microwave field energy conversion offered. To calculate the thermal effect of the interaction of dielectric material with the electromagnetic field is recommended equation that links the power output of magnetron and efficiency of the chamber.

Key words: efficiency; the microwave field; heating; the layer thickness; electric field intensity.

Аннотация. Проведен анализ эффектов преобразования энергии микроволнового поля в тепловую при взаимодействии с диэлектрическим материалом. Показано, что КПД микроволновой камеры зависит не только от массы загрузки, но и от соотношения толщины слоя и площади открытой поверхности образца. Предложены уравнения для расчета напряженности электрического поля и удельной теплоты преобразования энергии микроволнового поля.

Ключевые слова: эффективность; микроволновое поле; нагрев; толщина слоя; напряженность электрического поля.

Анотація. Проведений аналіз ефектів перетворення енергії мікрохвильового поля в теплову при взаємодії з діелектричним матеріалом. Доведено, що ККД мікрохвильової камери залежить не тільки від маси завантаження, а також від співвідношення товщини шару і площі відкритої поверхні зразка. Запропоновані рівняння для розрахунку середньої напруженості електричного поля і питомої теплоти перетворення енергії мікрохвильового поля.

Ключові слова: ефективність; мікрохвильове поле; нагрівання; товщина шару; напруженість електричного поля.

REFERENCES

- [1] Boshkova I. L., Volgusheva N. V., Dementeva T. Yu. *Razvitie energosberegayushchey sushilki dlya zerna na osnove mikrovolnovogo podogreva TEPRBP* [The development of energy-saving grain dryers based on microwave heating]. Yuzhno-Uralskiy gos. univ. Chelyabinsk, 2013, pp. 365–368.
- [2] Volgusheva, N. V. *Kinetika sushki plotnogo sloya dispersnogo materiala (na primere grechikhi) pri razlichnykh sposobakh podvoda teploty* Diss. of cand. of techn. sc. [Kinetics of drying of a dense layer of particulate material (for example buckwheat) with various methods of heat supply]. Odessa, 2005. 225 p.
- [3] Kalenderyan V. A., Boshkova I. L. *Teplomassoperenos v apparatakh s plotnym dispersnym sloem* [Heat and mass transfer in apparatus with a dense particulate layer]. Kiev, 2011. 184 p.
- [4] Rybakov, K. I. *Effekty vozdeystviya elektromagnitnogo polya v protsessakh vysokotemperaturnoy mikrovolnoy obrabotki materialov*. Avtoreferat diss. [The effects of the microwave electromagnetic field in the high temperature treatment of materials. Author's abstract]. Nizhniy Novgorod, 2013. 38 p.
- [5] Kozlov P. V., Lelevkin V. M. *Mikrovolnovoy nagrev i statsionarnye teplovye sostoyaniya keramicheskoy plastiny* [Microwave heating and stationary thermal condition of the ceramic plate]. *Vestnik KRCU «Teplofizika i teo-*

reticheskaya teplotekhnika» — Bulletin of KRSU «Thermal physics and theoretical heat engineering», 2006, Т. 6, no 5, pp. 20–29.

- [6] Yang H., Tang J. *Advances in Agricultural Science and Technology. Volume 1. Advances in Bioprocessing Engineering*. London, World Scientific, 2002, 172 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Энергетический кризис и увеличение спроса на продукцию улучшенного качества вызвали необходимость совершенствования традиционных технологий и развития новых. В этом направлении методы с использованием энергии микроволнового электромагнитного поля (МВ ЭМП) диэлектрических материалов давно зарекомендовали себя как высокоэффективные, применение которых признано целесообразным для модернизации ряда технологических схем производства и обработки материалов. В то же время следует констатировать, что в настоящее время промышленное микроволновое оборудование не нашло широкого применения. Существенными сдерживающими факторами является недостаточная полнота теоретических и экспериментальных исследований, что не позволяет определять совокупность эффектов, возникающих в материале под действием микроволнового поля, соответственно, неполнота представлений физических процессов взаимодействия микроволнового электромагнитного поля с неоднородными диэлектрическими материалами. Одной из ключевых проблем являлось определение условий, при которых энергия микроволнового электромагнитного поля с максимальной эффективностью поглощалась (преобразовывалась во внутреннюю энергию) исследуемого материала. Решение проблемы определения надежных методов оценки энергетической эффективности теплового эффекта взаимодействия диэлектрических материалов с микроволновым полем способно привести к существенному продвижению микроволновых технологий и развитию высокоинтенсивных и энергетически рациональных методов микроволновой термообработки.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вопрос энергетической эффективности является определяющим для большинства технологических процессов [2–6]. Одной из проблем, возникающих при разработке новых технологий, является снижение затрат потребляемой энергии при соблюдении требований к качеству конечного продукта. В настоящее время методы оценки энергоэффективности отличаются разнообразием, они могут включать такие характеристики, как теплофизические свойства, качество энергии, производительность и т. д., однако при всем многообразии подходов, определяемых спецификой конкретных разработок, универсальным критерием оценки эффективности тепловых процессов является коэффициент полезного действия КПД,

определение которого является отправной точкой в исследованиях, проводимых с целью оптимизации теплопереноса. Для расчета микроволновой энергии, преобразованной в тепловую, необходимо значение напряженности электрического поля. Удельная мощность, выделяющаяся в виде тепла в единице объема материала, находящегося в микроволновом поле, выражается уравнением (1) и связана с его диэлектрическими характеристиками, частотой МВ поля и напряженностью [6]:

$$q = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \epsilon'' \cdot E^2, \text{ Вт/м}^3, \tag{1}$$

где E — напряженность электрического поля, f — частота, ϵ'' — коэффициент потерь.

Оценка значений напряженности электрического поля E даже при существенной идеализации процесса взаимодействия твердых тел с проникающими электромагнитными полями не приводят к удовлетворительным результатам. Расчеты E , проведенные по зависимостям, предложенным в [5], получены с большой погрешностью вследствие неопределенности значений электропроводности и ряда других величин (коэффициент отражения, зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от температуры и частоты и пр.). Применение зависимости (1) достаточно проблематично, но анализ всех величин, входящих в него, и сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований их влияния на эффективность использования микроволновой энергии, изменений этих величин при изменении условий проведения опыта и в процессе опыта позволяют понять физические особенности преобразования микроволновой энергии.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является получение методических рекомендаций и расчетных зависимостей для оценки теплового эффекта взаимодействия диэлектрических материалов с микроволновым электромагнитным полем.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Экспериментальные исследования влияния микроволнового поля на растительный материал проводились на лабораторной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

Микроволновая энергия поступает в рабочую камеру прямоугольного сечения через волновод от магнетрона с частотой генерации 2,45 ГГц и регулируемой мощностью 80–800 Вт, при этом полезная мощность в условиях экспериментов была порядка 10–350 Вт. Конструкция микроволновой камеры позволяла одновременно с подводом МВ энергии

осуществлять продувку воздуха над слоем. При одновременном микроволновом и конвективном подводе теплоты воздух по воздуховоду нагнетался в камеру 2 вентилятором 6, нагреватель 7 с измерительным комплектом 8 и регулятором напряжения 9 позволяли получать воздух с различной температурой, которая изменялась в пределах 20...40 °С.

Для анализа эффективности поглощения микроволновой энергии материалом большое значение имели исследования зависимости величины поглощенной микроволновой энергии от загрузки камеры. Выражение общего энергетического КПД представляется в следующем виде: $\eta = \eta_m \cdot \eta_k$, где η_m — КПД магнетрона, η_k — КПД микроволновой камеры. Значение η_m показывает, с каким КПД магнетрон преобразует энергию электрического поля промышленной частоты (50 Гц) в энергию с частотой микроволнового поля. Эта величина является паспортной. Значение η_k зависит от условий согласования магнетрона с волноводом и загружаемым материалом, вследствие сложности ее предсказания возникает необходимость в проведении масштабных экспериментов.

Наибольшее количество опытов на установке, приведенной на рис. 1, было проведено с зерновым материалом, что позволяло исследовать особенности нагрева и удаления влаги из слоя для плотного слоя дисперсной системы (объемная концентрация частиц $5 \cdot 10^{-1} \leq \beta \leq 7,4 \cdot 10^{-1}$), относительно просто проводить измерения и анализировать процессы, протекающие в межзерновом пространстве.

КПД камеры рассчитывался как отношение теплоты, преобразованной материалом, при расчете которой учитывалось значение полезного теплового потока $Q_{\text{пол}}$, потери в окружающую среду (в объем рабочей камеры) в результате естественной конвекции $Q_{\text{конв}}$ и лучистого теплообмена между образцом и стенками камеры ($Q_{\Sigma} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{луч}}$), к выходной мощности магнетрона:

$$\eta_k = \frac{Q_{\Sigma}}{P_{\text{вых}}} \quad (2)$$

Для ряда зерновых материалов (овес, пшеница, ячмень, гречиха) получена эмпирическая зависимость, которая учитывает полноту загрузки камеры за счет введения симплекса V_m / V_k , где V_m — объем, занимаемый материалом, V_k — объем камеры [1]:

$$\eta_k = 0,67 \left(1 - \frac{0,45}{1 + e^{\left(\frac{V_m/V_k - 0,003}{0,0017} \right)}} \right) \left(\frac{u}{u_0} \right)^{1,3} \quad (3)$$

Зависимость (3) учитывает влияние влагосодержания введением симплекса $\left(\frac{u}{u_0} \right)$; здесь u — текущее влагосодержание, u_0 — начальное влагосодержание

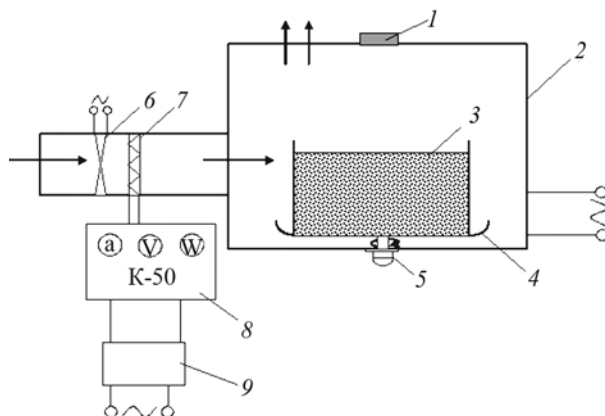


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процесса нагрева и сушки в микроволновом поле:

1 — волновод; 2 — рабочая камера; 3 — экспериментальная ячейка; 4 — подставка; 5 — механизм привода; 6 — вентилятор; 7 — нагреватель; 8 — измерительный комплект; 9 — регулятор напряжения

(в данных экспериментах $u_0 = 0,2$). При изменении относительного объема V_m / V_k от 0,0015 до 0,03 КПД камеры погрешность зависимости (3) составляет $\pm 17\%$. Применяя уравнение теплового баланса (без учета потерь в окружающую среду), значение напряженности электрического поля выразится следующей зависимостью:

$$E = \sqrt{\frac{q_{\text{пол}}}{5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta}} = \sqrt{\frac{cm\Delta t + \Delta m r}{5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta \cdot V \cdot \tau}}, \text{ В/м}, \quad (4)$$

где удельный тепловой поток $q_{\text{пол}}$, затрачиваемый на нагрев исследуемого образца объемом V и испарение влаги за время τ , определяется зависимостью:

$$q_{\text{пол}} = (c \cdot m \cdot \Delta t + \Delta m \cdot r) / (V \cdot \tau), \text{ Вт/м}^3. \quad (5)$$

Зависимость (4) можно уточнить, учтя потери в окружающую среду, которые определяются лучистой $Q_{\text{луч}}$ и конвективной $Q_{\text{конв}}$ составляющей. Кроме того, точность расчета зависит также от точности определения величин диэлектрических постоянных и от равномерности распределения электромагнитного поля в материале.

Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при исследовании процессов микроволновой обработки зерна гречихи [2], приведены в табл. 1. Анализ данных показывает, что на КПД микроволновой камеры влияет не только объем загрузки, но и условия формирования слоя: увеличение толщины слоя в определенных пределах при фиксированной массе материала приводит к увеличению КПД. При расчете КПД теплота, полученная от МВ поля, определялась с учетом потерь теплоты при естественной конвекции и лучистом теплообмене

Таблица 1. КПД микроволновой камеры η_k при различных соотношениях диаметра экспериментальной ячейки и толщины слоя (гречиха нешелушенная). Выходная мощность магнетрона $P_{\text{вых}} = 160$ Вт

№	m , кг	V_m/V_k	d , м	δ , м	Q_{Σ} , Вт	η_k
1	0,05	0,0012	0,055	0,008	41,5	0,26
2	0,05	0,0012	0,040	0,016	49,6	0,31
3	0,05	0,0012	0,028	0,032	56,0	0,35
4	0,10	0,0024	0,055	0,016	60,8	0,38
5	0,10	0,0024	0,040	0,032	65,6	0,41
6	0,10	0,0024	0,010	0,048	40,0	0,25
7	0,20	0,0048	0,105	0,009	51,2	0,32
8	0,20	0,0048	0,055	0,032	91,2	0,57
9	0,20	0,0048	0,045	0,048	92,8	0,58
9	0,31	0,0076	0,130	0,009	59,2	0,37
10	0,31	0,0076	0,096	0,016	96,0	0,60
11	0,31	0,0076	0,055	0,048	100,8	0,63
12	1,20	0,0290	0,110	0,048	107,2	0,67
13	1,20	0,0290	0,098	0,056	108,8	0,68

$Q_{\Sigma} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{луч}}$. Полезный тепловой поток $Q_{\text{пол}} = (c \cdot m \cdot \Delta t + \Delta m \cdot r) / \tau$, Вт. Для определения зависимости напряженности электрического поля от формы образца, его массы и диэлектрических характеристик можно применять формулу (1) и данные экспериментов, в ходе которых контролировалось изменение температуры Δt материала массой m и теплоемкостью c , изменение массы тела за счет испарения Δm (если этот процесс имел место).

Исследования показали, что уменьшение объема загрузки способствует увеличению напряженности электрического поля, но при этом КПД камеры снижается. В пределах загрузки с одной массой большое значение имеет соотношение площади открытой поверхности к толщине слоя. При расчетах принималось, что рабочая частота соответствовала $f = 2450$ МГц. Однако, вследствие особенностей генерации электромагнитных колебаний и их распространения в резонансной камере, значение рабочей частоты может отклоняться от номинальной. С изменением температуры анодного блока рабочая частота изменяется вследствие изменения частоты резонатора — т. наз. электронное смещение частоты; скорость изменения частоты составляет 50 кГц/град. В камере, работающей с неполной загрузкой, температура магнетрона будет повышаться, вызывая, соответственно, изменение частоты генерации электромагнитного поля.

При одинаковой массе напряженность электрического поля выше в образцах с большей толщиной. Этот результат на первый взгляд казался противоречащим теории. Действительно, можно было предполагать, что образцы с меньшей толщиной слоя и, соответственно, большей поверхностью будут иметь большую среднюю напряженность электрического поля, чем в образцах с меньшей открытой поверхностью и большей толщиной, поскольку чем

больше поверхность, тем больше микроволновой энергии попадает на образец. При прохождении вглубь образца микроволновая энергия уменьшается вследствие поглощения. Анализ экспериментальных данных привел к выводу, что проблема связана с особенностями резонансных камер. Остаточная МВ энергия, пройдя через слой образца и не поглощенная материалом, отразившись от стенок камеры, попадет обратно в магнетрон.

Расчет среднего значения напряженности электрического поля может быть произведен по зависимости:

$$\bar{E} = \sqrt{\frac{P_{\text{вых}} \cdot \eta_k}{(5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \epsilon' \cdot \text{tg} \delta) \cdot V}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{вых}}$ — выходная мощность магнетрона. Значение η_k находится по соответствующим эмпирическим зависимостям. Тогда для оценки теплоты, преобразованной в материале при взаимодействии с микроволновым полем, можно применить следующую зависимость:

$$q = \frac{P_{\text{вых}} \cdot \eta_k}{V}, \text{ Вт/м}^3, \quad (7)$$

где V — объем, занимаемый материалом.

ВЫВОДЫ. Напряженность электрического поля в микроволновой камере может быть определена с помощью теплового метода расчета и с использованием значений КПД микроволновой камеры, которые предлагается рассчитывать по эмпирическим зависимостям, полученным для конкретных видов диэлектрических материалов. Для оценки теплового эффекта взаимодействия диэлектрических материалов с микроволновым электромагнитным полем рекомендуется применять зависимость, связывающую выходную мощность магнетрона и КПД камеры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Бошкова, И. Л.** Развитие энергосберегающей сушилки для зерна на основе микроволнового подогрева ТЭПРБП / И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева, Т. Ю. Дементьева. // Южно-Уральский гос. ун-т. — Челябинск, 2013. — С. 365–368.
- [2] **Волгушева, Н. В.** Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты : дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.05 / Н. В. Волгушева. — О., 2005. — 225 с.
- [3] **Календерьян, В. А.** Тепломассоперенос в аппаратах с плотным дисперсным слоем : монография / В. А. Календерьян, И. Л. Бошкова. — К., 2011. — 184 с.
- [4] **Рыбаков, К. И.** Эффекты воздействия электромагнитного поля в процессах высокотемпературной микроволновой обработки материалов : автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук / К. И. Рыбаков. — Нижний Новгород, 2013. — 38 с.
- [5] **Козлов, П. В.** Микроволновой нагрев и стационарные тепловые состояния керамической пластины / П. В. Козлов, В. М. Лелевкин // Вестн. КРСУ. Теплофизика и теоретическая теплотехника. — 2006. — Т. 6. — № 5. — С. 20–29.
- [6] *Advances in Agricultural Science and Technology. Volume 1. Advances in Bioprocessing Engineering* / Editors H. Yang, J. Tang — London : WorldScientific, 2002. — 172 p.

© И. Л. Бошкова

Надійшла до редколегії 23.09.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *М. Р. Ткач*