

УДК 621.365.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПЛОСКОГО ДИЭЛЕКТРИКА В СВЧ-КАМЕРЕ ЛУЧЕВОГО ТИПА***С.В. Тригорлый, В.С. Алексеев, В.В. Захаров, С.Г. Калганова***Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Аннотация. Приведены результаты численного моделирования процесса мягкой СВЧ-сушки капиллярно-пористого материала в СВЧ-камере лучевого типа с применением рупорной антенны. Предложена математическая модель процесса СВЧ-сушки диэлектрика, основанная на взаимосвязанных уравнениях электродинамики и теплопереноса. Математическое моделирование осуществлялось с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Модель учитывает изменение диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь диэлектрика в процессе сушки в зависимости от его влагосодержания.

Ключевые слова: сушка, СВЧ-нагрев, диэлектрик, капиллярно-пористое тело, численное моделирование.

На сегодняшний день технологии СВЧ-термообработки диэлектриков имеют весьма широкие области применения: нагрев, пастеризация и стерилизация, вулканизация, полимеризация, дефростация, спекание, плавление, разрушение диэлектриков [1]. Одной из традиционных областей применения СВЧ-электротехнологии является сушка влажных диэлектриков. Области применения СВЧ-сушки весьма обширны. СВЧ-сушка применяется в сельском хозяйстве [2], в пищевой промышленности [3], при производстве керамики [4], в деревообрабатывающей промышленности [5], в полиграфической промышленности [6] и др.

Повышенный интерес к применению СВЧ-технологии для сушки диэлектриков обусловлен ее преимуществами перед традиционными видами нагрева (конвективным и кондуктивным): СВ-нагрев за счет объемного тепловыделения в диэлектрике обеспечивает перемещение влаги из внутренних слоев диэлектрика к наружной поверхности; нагреву подвергаются наиболее увлажненные области диэлектрика; безынерционность процесса обеспечивает высокую точность регулирования.

В процессе сушки повышенные градиенты температуры и давления в объеме диэлектрика могут приводить к нежелательным термомеханическим явлениям, таким как коробление, растрескивание. В случаях, когда по техническим услови-

Тригорлый Сергей Викторович (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология».

Алексеев Вадим Сергеевич (к.т.н.), заместитель заведующего кафедрой «Электроснабжение и электротехнология».

Захаров Вадим Валерьевич, аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология».

Калганова Светлана Геннадьевна (д.т.н.), заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехнология».

ям указанные явления недопустимы, применяются мягкие режимы сушки при температуре ниже 100 °С.

Перспективным направлением развития СВЧ-установок для сушки диэлектриков является разработка СВЧ-установок с камерами лучевого типа с использованием, например, рупорных антенн [1].

Целью данной работы является численное моделирование процесса мягкой СВЧ-сушки плоского влажного диэлектрика в СВЧ-камере лучевого типа с применением рупорной антенны. Основной задачей является моделирование распределений электрического, температурного поля и поля влагосодержания с учетом изменения диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь диэлектрика в процессе сушки в зависимости от его влагосодержания. Кроме того, необходима оценка влияния частоты СВЧ-генератора на распределения температуры и влагосодержания.

На рис. 1 схематично показана геометрическая модель камеры лучевого типа в виде рупорной антенны и плоского диэлектрика – асбоцементной плиты толщиной 0,2 м. Физические свойства материала диэлектрика и исходные расчетные параметры СВЧ-установки приведены в таблице.

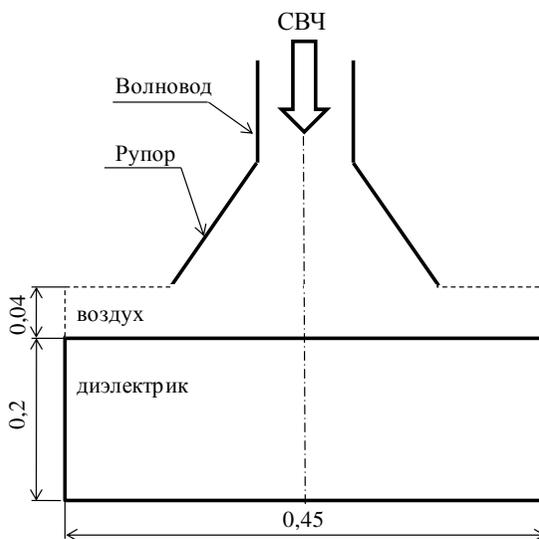


Рис. 1. Геометрическая модель задачи

Для описания процесса СВЧ-сушки использована модель конвекционной сушки капиллярно-пористого тела [7], которая дополнена уравнением, описывающим распространение и поглощение электромагнитной волны в диэлектрике с соответствующими начальными и граничными условиями. В результате задача мягкой СВЧ-сушки диэлектрика описывается следующей системой дифференциальных уравнений электродинамики и тепломассопереноса:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\varepsilon'_{r,eff} - \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0; \quad (1)$$

$$c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla (\lambda \nabla T) + \frac{\varepsilon r_0}{c_m} \frac{\partial U}{\partial \tau} + q_v; \quad (2)$$

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial U}{\partial \tau} = \nabla(a_d \delta \nabla T + a_d \nabla U), \quad (3)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость;
 E – вектор напряженности электрического поля;
 $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ – волновое число;
 $\varepsilon'_{r,eff}$ – эффективная относительная диэлектрическая проницаемость (действительная часть);
 $\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''_{r,eff}$ – электрическая проводимость;
 $\omega = 2\pi f$ – угловая частота;
 ε_0 – электрическая постоянная;
 $\varepsilon''_{r,eff}$ – эффективный коэффициент потерь (мнимая часть диэлектрической проницаемости);
 f – частота электромагнитного поля;
 c_p – удельная теплоемкость;
 ρ_0 – плотность;
 T – температура;
 τ – время;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 ε – критерий фазового перехода;
 r_0 – удельная теплота парообразования;
 U – влагосодержание;
 q_v – мощность внутренних источников теплоты;
 a_d – коэффициент диффузии влаги;
 δ – относительный коэффициент термодиффузии.

Уравнение (1) представляет собой волновую форму уравнений Максвелла для вектора напряженности электрического поля E – уравнение Гельмгольца [8].

Уравнения (2), (3) используются для описания процесса тепломассопереноса во влажном капиллярно-пористом теле и представляют собой уравнения Лыкова – Михайлова [9].

Связь задач электродинамики и тепломассопереноса осуществляется через соотношение, получаемое из теоремы Пойнтинга:

$$q_v = 0,5\omega\varepsilon_0\varepsilon_r'' \cdot |E|^2. \quad (4)$$

Для задания диэлектрической проницаемости $\varepsilon'_{r,eff}$ и коэффициента потерь $\varepsilon''_{r,eff}$ с учетом зависимости указанных свойств от влагосодержания U используется модель эффективных электрофизических свойств [10]:

$$\varepsilon_{r,eff} = U \cdot \frac{\rho_l}{\rho_s} \cdot \varepsilon_r^l + (1 - U \cdot \frac{\rho_l}{\rho_s}) \cdot \varepsilon_r^s, \quad (5)$$

где ρ_s, ρ_l – плотность сухого диэлектрика и воды соответственно;

$\varepsilon_r^s, \varepsilon_r^l$ – диэлектрическая проницаемость / коэффициент потерь сухого диэлектрика и воды соответственно.

Задача электродинамики решается для двух расчетных областей: воздух

и диэлектрик, при этом граничные условия задаются следующим образом.

Ввод СВЧ-энергии (распределение напряженности поля E_{in}) через торец прямоугольного волновода с размерами широкой и узкой стенки a и b задается выражением

$$E_{in} = 4Z_{TE} \frac{P_{in}}{ab} \cos \frac{\pi x}{a}, \quad (6)$$

где Z_{TE} – волновое сопротивление распространению электромагнитной волны TE_{10} при ее прохождении через прямоугольный волновод;

P_{in} – вводимая СВЧ-мощность;

x – координата вдоль широкой стенки волновода.

На внешних поверхностях расчетной области (см. рис. 1) задается условие отражения электромагнитной волны:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0, \quad (7)$$

где \mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности.

На границе воздух – диэлектрик имеют место условия сопряжения полей:

$$[\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1, \mathbf{n}] = 0, [\mathbf{n}, \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1] = 0, \mathbf{n}(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = 0, \mathbf{n}(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0, \quad (8)$$

где $\mathbf{H}_2, \mathbf{H}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_1$ – векторы напряженности магнитного и электрического поля;

$\mathbf{D}_2, \mathbf{D}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_1$ – векторы электрической и магнитной индукции для сред 2 и 1 соответственно;

\mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности, направленный из среды 1 в среду 2.

Начальные условия задачи электродинамики:

$$\mathbf{E}(0) = 0. \quad (9)$$

Задача тепломассопереноса решается только для области диэлектрика, при этом граничные условия задаются следующим образом. На нижней и боковых границах расчетной области задаются условия отсутствия тепло- и массообмена:

$$\frac{\partial U}{\partial \mathbf{n}} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad (10)$$

где \mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности.

На поверхности тепло- и массообмена задаются граничные условия:

$$-\lambda \nabla T + h_m(T_c - T) - (1 - \varepsilon)r_0 \alpha_m \rho_0 (U - U_r) = 0; \quad (11)$$

$$\alpha_d \delta \nabla T + \alpha_d \nabla U + \alpha_m (U - U_r) = 0,$$

где h_m – коэффициент теплоотдачи с поверхности;

T_c – температура окружающей среды;

α_m – коэффициент массоотдачи;

U_r – влагосодержание окружающей среды.

Начальные условия задачи тепломассопереноса:

$$T(0) = T_0; \quad U(0) = U_0, \quad (12)$$

где T_0 – начальная температура тела; U_0 – начальное влагосодержание тела.

Исходные данные для моделирования приведены в таблице.

Исходные данные для моделирования

Параметр	Значение	Параметр	Значение
c_p , Дж/(кг·К)	960	T_0 , К	293,15
ρ_s , кг/м ³	1700	U_0 , кг/кг	0,5
ρ_l , кг/м ³	1000	U_r , кг/кг	0,39
λ , Вт/(м·К)	1,76	f , ГГц	2,45, 0,915
ε	0,7	μ_r	1
r_0 , Дж/кг	$2,26 \cdot 10^6$	ε_r^{ns}	7
a_d , м ² /с	$2,3 \cdot 10^{-8}$	ε_r^{ns}	1,4
h_m , Вт/(м ² ·К)	10	ε_r^l	70
α_m , м/с	0,05	ε_r^l	15
T_c , К	293,15	p_{in} , Вт	300

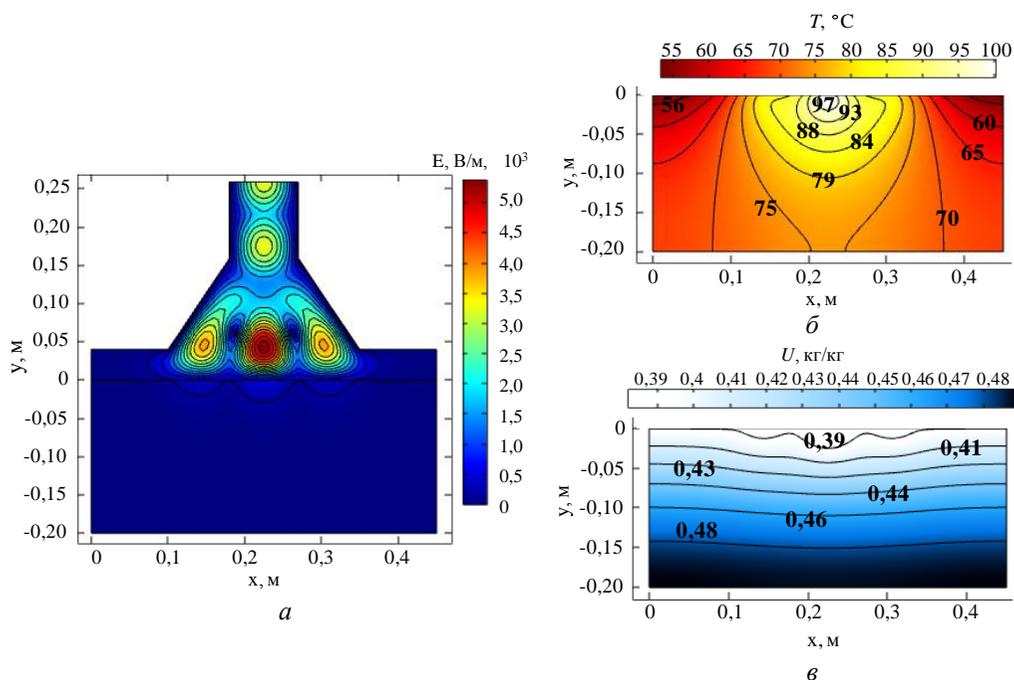


Рис. 2. Результаты моделирования (на частоте 2450 МГц):
 а – напряженность электрического поля, В/м; б – изотермы, °С;
 в – линии одинакового влагосодержания, кг/кг

В качестве инструмента для моделирования выбрано программное обеспечение COMSOL Multiphysics, позволяющее решать мультидисциплинарные технические задачи, описываемые дифференциальными уравнениями с применением метода конечных элементов. Для численного моделирования использован специальный прикладной режим программного обеспечения COMSOL Multiphysics – Coefficient form PDE. Данный режим позволяет в коэффициентной форме задавать пользовательские дифференциальные уравнения и их системы.

Моделирование проводилось для частот СВЧ-генератора 2450 МГц и 915 МГц при соответствующих размерах рупорной антенны. Результаты моделирования представлены на рис. 2–5.

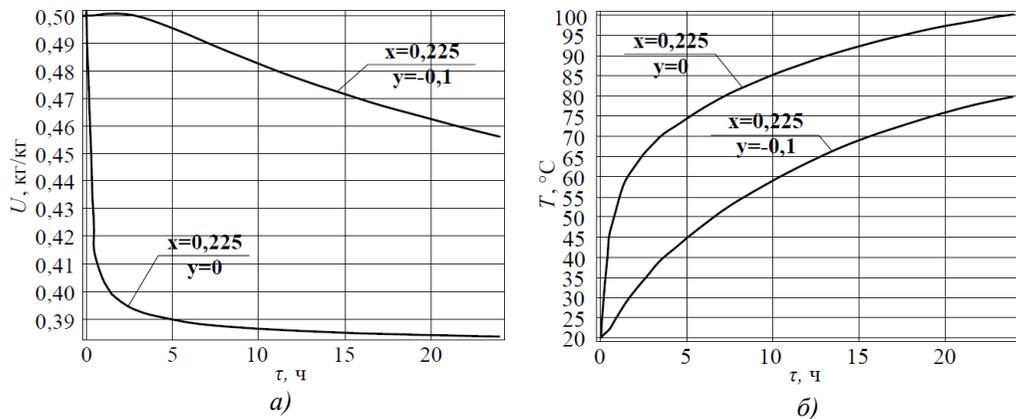


Рис. 3. Результаты моделирования (на частоте 2450 МГц):
 а – изменение влагосодержания во времени; б – изменение температуры во времени

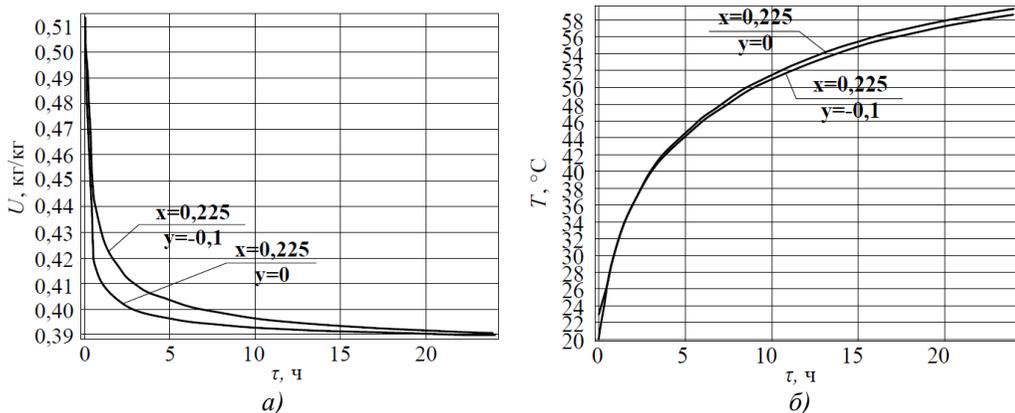


Рис. 4. Результаты моделирования (на частоте 915 МГц):
 а – изменение влагосодержания во времени; б – изменение температуры во времени

На рис. 2 приведены распределения напряженности электрического поля, температурного поля и поля влагосодержания для момента времени сушки $\tau = 24$ ч при СВЧ-нагреве на частоте 2450 МГц. Из рис. 2 прослеживается качественное совпадение формы изолиний электрического поля (см. рис. 2а) и поля

влажностеродержания (см. рис. 2в). Температурный максимум находится на оси симметрии рупорной антенны на глубине около 1 см от наружной поверхности асбоцементной плиты (см. рис. 2б).

На рис. 3 приведены графики изменения влагостеродержания и температуры во времени при СВЧ-нагреве на частоте 2450 МГц, на основании которых можно сделать вывод о значительной неравномерности влагостеродержания между поверхностью ($x = 0,225$ м, $y = 0$ м) и центром ($x = 0,225$ м, $y = -0,1$ м) диэлектрика в процессе сушки (от 17 до 21 %). Неравномерность температуры при этом составляет около 32 %.

На рис. 4 приведены графики изменения влагостеродержания и температуры во времени при СВЧ-сушке на частоте 915 МГц. При СВЧ-сушке на частоте 915 МГц неравномерность влагостеродержания между поверхностью и центром диэлектрика не превышает 2,9 % (см. рис. 4). Неравномерность температуры не превышает 3,3 %.

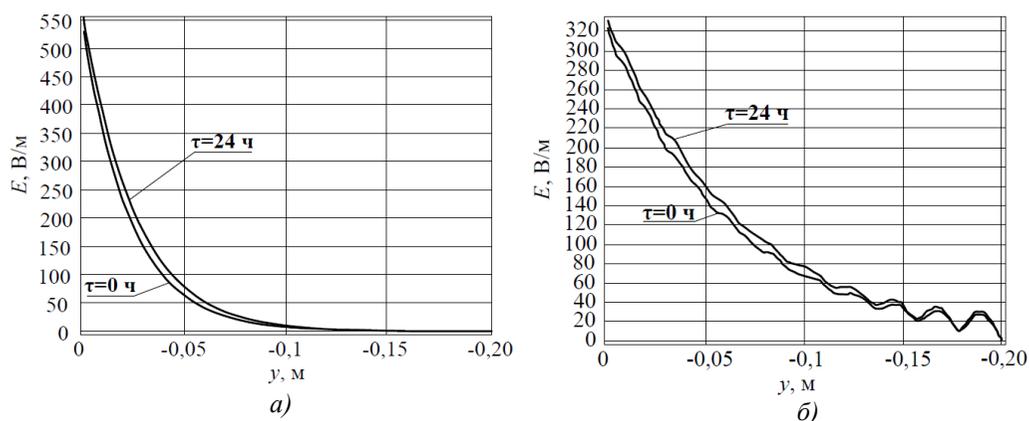


Рис. 5. Результаты моделирования распределения напряженности электрического поля: а – на частоте 2450 МГц; б – на частоте 915 МГц

Максимальная температура нагрева диэлектрика через 24 ч сушки составляет: на частоте 915 МГц – 59 °С, на частоте 2450 МГц – 98 °С. Скорость сушки всего объема диэлектрика на частоте 915 МГц выше, чем на частоте 2450 МГц (см. рис. 3а и 4а).

Полученные результаты объясняются тем, что на частоте 915 МГц глубина проникновения электромагнитной волны в диэлектрик больше, чем на частоте 2450 МГц. На частоте 915 МГц режим сушки более «мягкий», что снижает вероятность возникновения термомеханических явлений.

На рис. 5 приведены распределения напряженности электрического поля по толщине диэлектрика при сушке на частотах 2450 и 915 МГц для моментов времени, соответствующих началу ($\tau = 0$ ч) и окончанию ($\tau = 24$ ч) сушки. Из рис. 5 видно изменение напряженности электрического поля в процессе сушки, что связано с тем, что в модели учитывается изменение диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь в зависимости от влагостеродержания, изменяющегося в процессе сушки. Напряженность электрического поля с учетом влияния указанных факторов изменяется в пределах 0–10 %.

В результате моделирования установлено влияние учета изменения диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь в зависимости от влагостеродержания диэлектрика на распределение полей температуры и влагостеродержания

в процессе СВЧ-сушки. Расхождение результатов моделирования с учетом и без учета указанных зависимостей составляет: для поля температуры – 2,5–14,3 %, для поля влагосодержания – 0,25–1,3 %.

На частоте 2450 МГц отражающая стенка в нижней части диэлектрика ($y = -0,2$ м) не приводит к отражению электромагнитной волны ввиду малой глубины ее проникновения. На частоте 915 МГц данные отражения присутствуют и оказывают незначительное влияние на поле температуры и влагосодержания.

По результатам данной работы можно сделать следующие выводы.

1. Предложенная математическая модель мягкой СВЧ-сушки капиллярно-пористого диэлектрика адекватно описывает происходящие в процессе термообработки процессы. Результаты моделирования качественно соответствуют известным представлениям о процессах тепло- и массопереноса, происходящих при сушке капиллярно-пористых диэлектриков в поле СВЧ.

2. Установлено влияние изменения диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь в функции влагосодержания на напряженность электрического поля, температуру и влагосодержание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Архангельский Ю.С.* СВЧ-электротермия. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. – 408 с.
2. *Комаров В.И., Молохов М.Н., Садковская О.Д. и др.* Сушка сельскохозяйственных продуктов в промышленных СВЧ-установках // Применение СВЧ-энергии в технологических процессах и научных исследованиях: тез. докл. Всесоюз. VI науч.- практ. конф. 11-13 июня 1991. – Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1991. – С. 25–26.
3. *Иванов А.С., Иванов В.А., Сапунов Г.С., Янкевич В.Б.* Исследование процесса обезвоживания пищевых продуктов в микроволновых вакуумных установках // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы междунар. науч.- техн. конф. 7–9 сентября 1998. – Саратов: Саратов гос. техн. ун-т, 1999. – Ч. III. – С. 135–138.
4. Микроволновая технология сушки керамических материалов / *А.А. Крупа, М.Е. Ильченко, В.А. Михайленко, В.А. Макогон* // Стекло и керамика. – 1993. – № 1. – С. 21–23.
5. *Бомбин А.М., Гутман А.Л., Лисицын В.И., Саушкин В.В.* Сушка пиломатериалов больших размеров в поле сверхвысокой частоты // Современ. пробл. технологии деревообработ. промышленности: тез. докл. науч. конф., посвящ. 35-летию фак. «Технол. деревообработ.». – Воронеж: Гос. лесотехн. акад., 1995. – С. 29–30.
6. *Байбурин В.Б., Максименко Б.Н., Терентьев А.А. и др.* СВЧ-резонатор для сушки бумаги // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы междунар. науч.- техн. конф. 10–12 сентября 1996. – Саратов: Саратов гос. техн. ун-т, 1996. – Ч. 2. – С. 59–60.
7. *Алексеев В.С.* Применение программного комплекса COMSOL Multiphysics для моделирования процесса сушки влажных капиллярно-пористых материалов // Вопросы электротехнологии. – 2015. – № 1/2015. – С. 10–15.
8. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
9. *Лыков А.В.* Теплообмен: справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
10. *Электротехнические материалы: Учебник для вузов / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев.* – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с.

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2018 г.

NUMERICAL MODELING OF THE PLANE DIELECTRIC DRYING PROCESS IN THE RAY TYPE MICROWAVE CHAMBER

S.V. Trigorly, V.S. Alekseev, V.V. Zakharov, S.G. Kalganova

Yuri Gagarin Saratov State Technical University
77, Politechnicheskaya st., Saratov, Russian Federation

Abstract. *The results of numerical modeling of the process of soft microwave drying of capillary-porous material in a ray type microwave chamber with the use of a horn antenna are presented. A mathematical model of the microwave drying process of a dielectric based on coupled equations of electrodynamics and heat and mass transfer is proposed. Mathematical modeling was carried out using the finite element method implemented in the COMSOL Multiphysics software. The model takes into account the change in dielectric permittivity and dielectric loss factor in the drying process, depending on its moisture content.*

Keywords: *drying, microwave heating, dielectric, capillary-porous material, numerical simulation.*

Sergey V. Trigorly (Ph. D.(Techn.)), Associate professor.

Vadim S. Alekseev (Ph. D.(Techn.)), Associate professor, Deputy Head: Department of Electricity Supply and Electrotechnics.

Vadim V. Zakharov, Postgraduate.

Svetlana G. Kalganova (Dr. Sc.(Techn.)), Professor, Head: Department of Electricity Supply and Electrotechnics.