

- Kom. Mot. Energ. Roln. – OL. PAN, 2009. – V. IX. – P. 267–276.
6. Skurihin L.V. Vybora shagovogo dvigatelja dlja dorozhnogo printera // Mat-ly Mezhdunar. nauch. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchjonyh. – URL: <http://conf.sfu-kras.ru/mn2015/?q=napravlenija-i-sekcii/stroitelstvo-formirovanie-sredy-dlja-zhizni-mehanizacija-i-avtomatizacija>.
7. Aniket B. Kabde, A. Dominic Savio Position Control of Stepping Motor // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2014. – V. 3, № 4 – URL: ijareeie.com/upload/2014/april/64_Position.pdf.



УДК 621.365.5:621.319.4

А.Н. Качанов, Д.А. Коренков

ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛОСКОМ КОНДЕНСАТОРЕ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

A.N. Kachanov, D.A. Korenkov

ELECTROMAGNETIC FIELD DESCRIPTION IN THE FLAT CAPACITOR AT LENGTHY DIELECTRICS HIGH FREQUENCY HEATING

Качанов А.Н. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. электрооборудования и энергосбережения Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, г. Орел. E-mail: kan@ostu.ru

Коренков Д.А. – ст. преп. каф. электрооборудования и энергосбережения Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, г. Орел. E-mail: dimas.corenkov@yandex.ru

Kachanov A.N. – Dr. Techn. Sci., Prof., Head, Chair of Electric Equipment and Energy Saving, Oryol State University named after I.S. Turgenev. Oryol. E-mail: kan@ostu.ru

Korenkov D.A. – Asst, Chair of Electric Equipment and Energy Saving, Oryol State University named after I.S. Turgenev. Oryol. E-mail: dimas.corenkov@yandex.ru

В статье рассматриваются вопросы высокочастотного нагрева. Исследование посвящено неравномерности нагрева, главной причиной которой является волновой характер распределения электромагнитного поля в материале. Неравномерность повышается с увеличением частоты поля и габаритов материала. Данная проблема особенно актуальна для высокочастотных аппаратов для сушки древесины, длина загрузки которых может достигать 8 м. Для демонстрации неравномерности производятся расчеты распределения напряженности электрического поля на разных частотах. Задача рассматривается в одномерной постановке. В качестве диэлектрика выбрана древесина. Вычисления осуществляются 3 способами математического описания волновых явлений. Первый способ

основывается на системе уравнений Максвелла и после ряда преобразований приводится к косинусоидальному виду. Второй описывает распределение электромагнитного поля в многослойной среде. Последний способ предложен авторами и включает волновое уравнение Гельмгольца и граничные условия симметрии на свободном конце конденсатора и третьего рода в точке подключения токопровода. Для проверки корректности каждой из рассмотренных математических моделей приводятся ранее полученные экспериментальные данные распределения напряжения по длине электродов рабочего конденсатора. На основе анализа расчетных и экспериментальных результатов делаются выводы, что первый способ наименее точный. Это объясняется пренебрежением коэффициента затухания,

который для влажной древесины обладает существенной величиной. Второй способ более точный, но, так же как и первый, привносит дополнительную погрешность в узлах напряжения. Максимальное совпадение с экспериментом обеспечивает предложенная авторами модель при различных соотношениях длины волны и длины загрузки.

Ключевые слова: высокочастотный нагрев древесины, распределение электромагнитного поля, вакуумно-диэлектрическая сушка.

In the study the questions of high-frequency heating were considered. The research was devoted to the nonuniformity of heating. The main reason of nonuniformity was wave nature of electromagnetic field distribution in material. Nonuniformity increases with the increase of frequency and dimensions of material. This problem is especially actual for high-frequency drying kilns because the length of loading can reach 8 m. Calculations of distribution of electric field strength were made at different frequencies to demonstrate the non-uniformity of the field. One-dimensional distribution was considered. Timber was chosen as dielectric. Calculations were carried out by 3 methods of mathematical description of wave phenomena. The first method was based on the system of Maxwell's equations and after a number of mathematical operations was transformed to a cosinusoidal view. The second method described the distribution of the electromagnetic field in the multilayered material. Given method was offered by the authors and included Helmholtz's wave equation and boundary conditions of symmetry on free end of capacitor and Newton's boundary condition in the point of connection of the current distributor. Earlier obtained experimental data of voltage distribution on the length of working capacitor electrodes were given to check the accuracy of considered mathematical models. It was concluded that the first method was the least exact drawn on the analysis of calculated and experimental results. It was explained by the neglect of the coefficient of attenuation which had essential value for damp timber. The second method was more exact, but as well as the first one, introduced additional error in voltage node. The maximum agreement with experimental results was provided by the model offered by the authors in the case of different ratios of wavelength

and length of loading.

Keywords: high-frequency heating of timber, distribution of electromagnetic field, vacuum and dielectric drying.

Введение. Высокочастотный (ВЧ) диэлектрический нагрев используется во множестве технологических процессов различных отраслей промышленности. Основные требования, предъявляемые к ВЧ нагревательным установкам, заключаются в обеспечении достаточной интенсивности и равномерности нагрева. Соблюдение данных требований зависит от правильного выбора частоты и мощности ВЧ-генератора. На этапе проектирования, чтобы определить оптимальные параметры генератора, часто прибегают к математическому моделированию процесса нагрева с использованием дифференциального уравнения теплопроводности Фурье с внутренними источниками теплоты [1–4]

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q, \quad (1)$$

где c – теплоемкость, Дж/(кг·°C); ρ – плотность, кг/м³; τ – время, с; λ – теплопроводность, Вт/(м·°C); T – температура, °C; Q – удельная мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³.

Вопрос об обеспечении равномерного нагрева наиболее существенен для процессов термической обработки длинномерных диэлектриков, например для ВЧ-сушки пиломатериалов. В этом случае точность моделирования сильно зависит от правильного задания закона распределения удельной мощности Q , пропорциональной квадрату напряженности электрического поля [1]. Как будет показано ниже, известные способы описания волнового характера распределения электромагнитного поля имеют ограничения и подходят только для приближенных расчётов.

Цель работы. Поиск более точного способа описания электромагнитного поля в процессах ВЧ-нагрева длинномерных диэлектриков.

Задачи: получить более точную математическую модель волнового распределения напряженности электрического поля и проверить её адекватность.

ВЧ-сушка пиломатериалов проводится в конвективно-диэлектрических и вакуумно-диэлектрических камерах, которые снабжаются

генераторами, работающими на частотах 5,28 или 13,56 МГц, и предназначены для сушки штабелей древесины длиной до 6,5 м [5]. В то же время длина волны вдоль волокон сосновых досок при температуре 20°C и влажности 10 %

на частоте 13,56 МГц составляет 14 м [6], т.е. она всего в 2,15 раза больше длины материала. Поэтому ВЧ сушильные камеры являются ярким примером объектов с распределёнными параметрами.

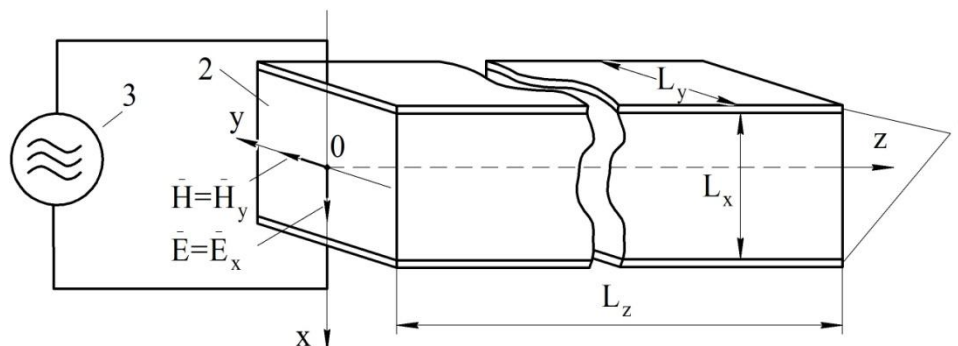


Рис. 1. Принцип установки для высокочастотного нагрева:
1 – электроды; 2 – материал; 3 – высокочастотный генератор

В отмеченных камерах электроды образуют со штабелем плоскопараллельный конденсатор, причём его длина L_z обычно в 5–6 раз превосходит остальные габариты L_x и L_y . Система координат приведена на рисунке 1. Описание электромагнитного поля осуществляется с помощью уравнений Максвелла, которые после ряда преобразований сводятся к волновым уравнениям Фредгольма для векторов напряженности электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей [4]. Ввиду малости высоты и ширины штабеля по сравнению с длиной волны изменениями векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ вдоль осей oy и ox пренебрегаем. Тогда уравнения Фредгольма могут быть упрощены до одномерной формы:

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_x}{\partial z^2} - \tilde{k}^2 \dot{E}_x = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{H}_y}{\partial z^2} - \tilde{k}^2 \dot{H}_y = 0, \quad (3)$$

где $\tilde{k}$ – волновой коэффициент, 1/м;

$$\tilde{k}(z) = j \cdot 2\pi \cdot f \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon (1 - j \cdot \tan \delta)} = \alpha + j \cdot \beta,$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; α – коэффициент затухания, 1/м; β – коэффициент фазы, 1/м.

Аналитическое решение уравнения (2) приведено в [7] для среды с постоянными свойствами и допущением об отсутствии затухания

волн ($\alpha = 0$). После ряда преобразований оно записывается в виде

$$E_x(z) = E_{\max} \cos(\beta(L_z - z)), \quad (4)$$

где $E_{\max}$ – максимальное значение напряженности электрического поля (В/м), наблюдаемое на крае электродов, противоположном точке подключения генератора.

Такое упрощенное описание не может быть использовано при моделировании процессов диэлектрического нагрева по ряду причин. Во-первых, многие материалы, в том числе и влажная древесина, обладают существенным коэффициентом α , и дополнительным источником неравномерности нагрева является затухание электромагнитных волн. Во-вторых, диэлектрические свойства многих материалов зависят от температуры, а в случае древесины – ещё и от влажности. Поэтому в процессе сушки волновой коэффициент оказывается непостоянным как в пространстве, так и во времени.

В зарубежной литературе можно найти способ описания волнового характера распределения поля при неоднородном коэффициенте распространения, который используется при моделировании микроволнового нагрева. Согласно [8], исследуемый объект разбивают на участки. В пределах каждого из них диэлектрические свойства усредняются, и определяется волновой коэффициент $\tilde{k}$. Для i -го участка распределение напряженности электрического поля

находят по закону

$$\dot{E}_i(z_i) = \tilde{A}_i \left(e^{-j\tilde{k}_i \cdot z_i} + \tilde{R}_{i,i+1} e^{-j(\tilde{k}_i \cdot z_i - 2\tilde{k}_i \cdot i \cdot \Delta)} \right); \quad (5)$$

$$i \cdot \Delta \leq z_i \leq (i+1) \cdot \Delta,$$

где $\tilde{A}_i$ – амплитуда напряжённости электрического поля i -го участка, В/м; $\tilde{R}_{i,i+1}$ – коэффициент отражения на границе i и $i+1$ участков; Δ – ширина участков.

Формулы для вычисления коэффициентов $\tilde{A}_i$ и $\tilde{R}_{i,i+1}$ приведены в указанном источнике. В работе [9] данный способ был применен для вычисления поля в конденсаторе при высокочастотной сушке древесины. Ниже произведён сравнительный анализ результатов и сделаны выводы об ограничениях его использования.

Также в литературе, например [3, 10], встречается способ, заключающийся в непосредственном численном решении волнового уравнения (2), которое с учетом неоднородности диэлектрических свойств записывается в виде

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_x}{\partial z^2} - \tilde{k}^2(z) \dot{E}_x = 0. \quad (6)$$

Решение может быть легко получено методом конечных разностей, однако основной вопрос возникает при выборе граничных условий. В [10] при моделировании процесса СВЧ-нагрева на конце загрузки со стороны излучателя ставится следующее уравнение:

$$\frac{\partial \dot{E}_x(0)}{\partial z} = \tilde{k}(0) (\dot{E}_x(0) - 2 \cdot E_0), \quad (7)$$

где E_0 – амплитуда падающей волны. Вычисления показывают, что достаточная сходимость с экспериментальными данными обеспечивается при замене в (7) параметра $2 \cdot E_0$ на $E_{\max}$ и использовании на свободном конце условия симметрии. Таким образом, авторами данной статьи предлагаются следующие граничные условия:

в точке подключения генератора

$$\frac{\partial \dot{E}_x(0)}{\partial z} = \tilde{k}(0) (\dot{E}_x(0) - E_{\max}); \quad (8)$$

на свободном краю электродов

$$\frac{\partial \dot{E}_x(L_z)}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

Сравним кривые распределения напряженности электрического поля, полученные по формуле (4), способом [8] и путём численного решения системы (6), (8), (9). Также сопоставим результаты расчётов с экспериментальными данными, приведёнными в [11]. Здесь изучалась зависимость напряжения на электродах от расстояния до точки подключения на частотах 1,76; 5,28 и 13,56 МГц при длине конденсатора 8 м. В эксперименте конденсатор был заполнен сосновым пиломатериалом («сухая» плотность 400 кг/м³) в комнатно-сухом состоянии (влажность 8–12 %). С учётом зависимости [12] диэлектрических свойств от плотности древесины и частоты поля, а также с учётом поправки плотности на влажность [13] принимаем их равными: $\varepsilon = 2,2$, $\text{tg} \delta = 0,25$. Теоретические и практические кривые имеют разные размерности. Однако напряжение на электродах в конкретной точке пропорционально напряжённости $\dot{E}_x$ в материале в этой же точке, поэтому для удобства анализа представим результаты в безразмерной форме. Для этого разделим соответствующую функцию распределения на её максимальное значение

ности электрического поля, полученные по формуле (4), способом [8] и путём численного решения системы (6), (8), (9). Также сопоставим результаты расчётов с экспериментальными данными, приведёнными в [11]. Здесь изучалась зависимость напряжения на электродах от расстояния до точки подключения на частотах 1,76; 5,28 и 13,56 МГц при длине конденсатора 8 м. В эксперименте конденсатор был заполнен сосновым пиломатериалом («сухая» плотность 400 кг/м³) в комнатно-сухом состоянии (влажность 8–12 %). С учётом зависимости [12] диэлектрических свойств от плотности древесины и частоты поля, а также с учётом поправки плотности на влажность [13] принимаем их равными: $\varepsilon = 2,2$, $\text{tg} \delta = 0,25$. Теоретические и практические кривые имеют разные размерности. Однако напряжение на электродах в конкретной точке пропорционально напряжённости $\dot{E}_x$ в материале в этой же точке, поэтому для удобства анализа представим результаты в безразмерной форме. Для этого разделим соответствующую функцию распределения на её максимальное значение

$$E^*(z) = \frac{|\dot{E}_x(z)|}{\max(|\dot{E}_x(z)|)}; U^*(z) = \frac{|U(z)|}{\max(U(z))}.$$

В этом случае величину $E_{\max}$ можно задать произвольно. Результаты показаны на рисунке 2.

На частоте 1,76 МГц (рис. 2, а) отношение длин конденсатора и волны составляет 0,07. Формула (4) и система (6), (8), (9) достаточно точно предсказывают распределение напряжённости электрического поля. Кривая E2, полученная способом [8], демонстрирует максимальную напряжённость в точке подключения генератора, чего не наблюдается на практике. Тем не менее данный способ может быть использован при зеркальном отображении результатов расчёта (кривая E2'). Аналогичные выводы можно сделать и для частоты 5,28 МГц ($L/\lambda = 0,2$), причем наиболее точно повторяет эксперимент кривая E3 (рис. 2, б).

При частоте генератора 13,56 МГц длина волны больше конденсатора всего в 2 раза. Здесь начинает проявляться затухание электромагнитных колебаний. На рисунке 2, в видно, что уровни напряжённости в точке подключения

и на противоположном краю одинаковы, если в расчёте пренебречь коэффициентом α (кривая E1). В то же время практика показывает снижение напряженности на противоположном краю конденсатора почти на 25 % (кривая U). На данной частоте результаты решения системы (6),

(8), (9) (кривая E3) также максимально приближены к экспериментальным. Вычисления способом [8] неудовлетворительны вне зависимости от направления отображения кривой E2, поэтому он может быть использован только при малых соотношениях L/λ .

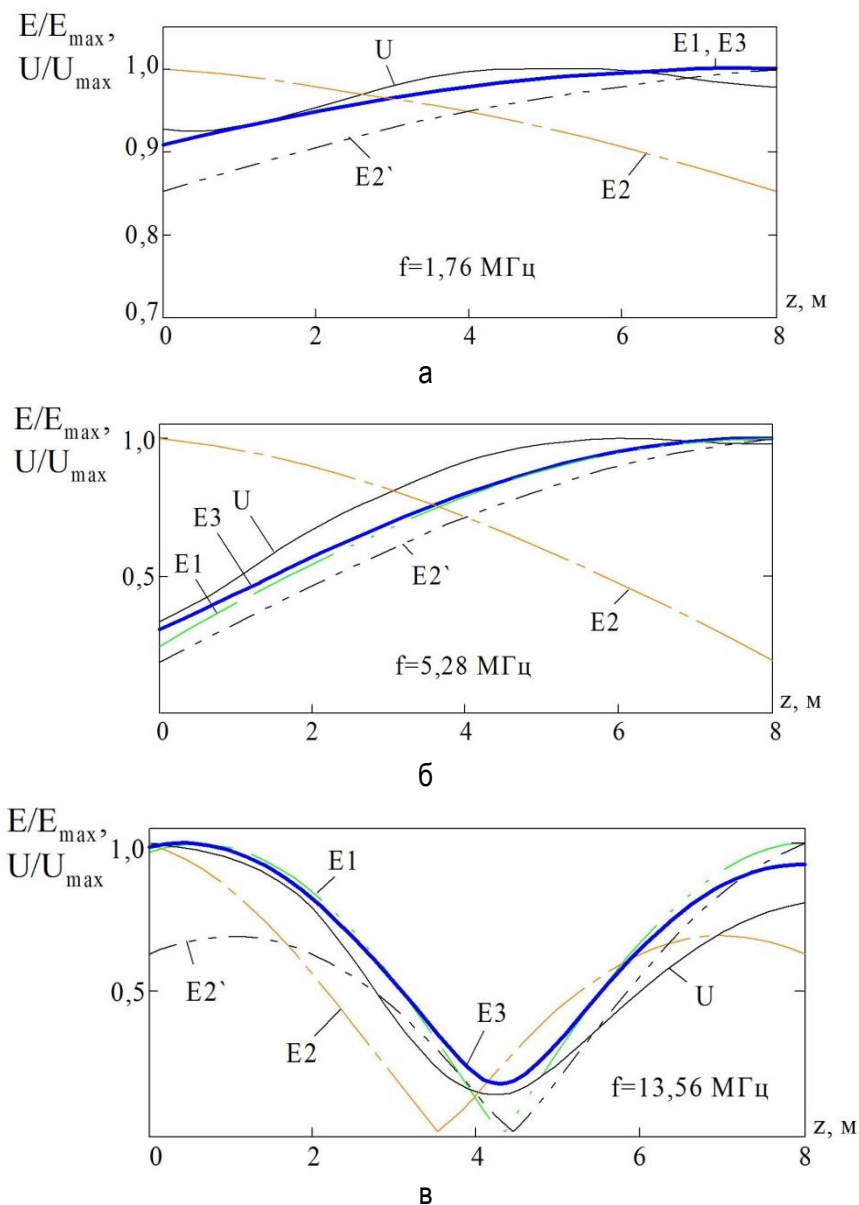


Рис. 2. Кривые распределения напряженности электрического поля и напряжения на электродах: а – результат расчёта по формуле (4); б – результат расчёта способом [8]; в – зеркально отображенная кривая б; г – результат решения системы (6), (8), (9); д – экспериментальная кривая по данным [10]

Выводы. Предложен способ описания волнового распределения напряженности электрического поля на основе дифференциального уравнения Гельмгольца, дополненного авторскими граничными условиями.

Полученный способ рекомендуется использовать для моделирования высокочастотного нагрева длинномерных материалов с однородными и неоднородными переменными свойствами.

Полученный способ достаточно адекватно описывает распределение электромагнитного поля даже при больших величинах отношения длины конденсатора к длине волны.

Литература

1. Марков А.В. Математическая модель СВЧ-термообработки влажных материалов // Прикладная физика. – 2005. – № 3. – С. 92–95.
2. Petrescu C., Ferariu L. Modeling of dielectric heating in radio-frequency applicator optimized for uniform temperature by means of genetic algorithms // International journal of computer, electrical, automation, control and information engineering. – 2008. – Vol. 2. – № 11. – P. 3668–3673.
3. Palade P.A., Vicaș S.M., Vușcan F.B. Aspects regarding the wood processing in high frequency electromagnetic fields // Analele Universității din Oradea Fascicula: Ecotoxicologie, zootehnie și tehnologii de industrie alimentară. – 2010. – P. 1207–1214.
4. Hossan M.R., Dutta P. Effects of temperature dependent properties in electromagnetic heating // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55. – P. 3412–3422.
5. Качанов А.Н., Чукумов М.Н. Повышение качества сушки на ПМО “Арай” // Проблемы комплексного развития регионов Казахстана: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. – Алматы: Изд-во КазгосИНТИ, 1996. – С. 131–134.
6. Качанов А.Н., Коренков Д.А. Повышение энергоэффективности камер для вакуумно-диэлектрической сушки // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах: лекции 2-й Междунар. конф. с элементами научной школы. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2015. – С. 84–92.
7. Княжевская Г.С., Фирсова М.Г., Килькеев Р.Ш. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / под ред. А.Н. Шамова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1989. – 64 с.
8. Alpert Y., Jerby E. Coupled thermal-electromagnetic model for microwave heating of temperature-dependent dielectric media // IEEE Transactions on plasma science. – 1999. – Vol. 27. – № 2. – P. 555–562.
9. Коренков Д.А. Распределение внутренних

источников теплоты в процессе сушки древесины вакуумно-диэлектрическим способом // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: сб. науч. тр. XIII Междунар. науч.-практ. интернет-конф. – Орел, 2015. – С. 89–94.

10. Jolly P., Turner I. Non linear field solution of one dimensional microwave heating // Journal of microwave power and electromagnetic energy. – 1990. – Vol. 25. – № 1. – P. 3–15.
11. Дьяконов К.Ф., Горяев А.А. Сушка древесины токами высокой частоты. – М.: Лесн. пром-сть, 1981. – 168 с.
12. Torgovnikov G.I. Dielectric properties of wood and wood based materials. – Berlin: Springer Verlag, 1993. – 194 p.
13. Справочник по сушке древесины / Е.С. Богданов, В.А. Козлов, В.Б. Кунтыш [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 304 с.

Literatura

1. Markov A.V. Matematicheskaja model' SVCh-termoobrabotki vlazhnyh materialov // Prikladnaja fizika. – 2005. – № 3. – S. 92–95.
2. Petrescu S., Ferariu L. Modeling of dielectric heating in radio-frequency applicator optimized for uniform temperature by means of genetic algorithms // International journal of computer, electrical, automation, control and information engineering. – 2008. – Vol. 2. – № 11. – P. 3668–3673.
3. Palade P.A., Vicaș S.M., Vușcan F.B. Aspects regarding the wood processing in high frequency electromagnetic fields // Analele Universității din Oradea Fascicula: Ecotoxicologie, zootehnie și tehnologii de industrie alimentară. – 2010. – P. 1207–1214.
4. Hossan M.R., Dutta P. Effects of temperature dependent properties in electromagnetic heating // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55. – P. 3412–3422.
5. Kachanov A.N., Chukumov M.N. Povyshenie kachestva sushki na PМО “Araj” // Problemy kompleksnogo razvitija regionov Kazahstana: mat-ly Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ch. 1. – Almaty: Izd-vo KazgosINTI, 1996. – S. 131–134.
6. Kachanov A.N., Korenkov D.A. Povyshenie jenergojeffektivnosti kamer dlja vakuumno-dielektricheskoj sushki // Aktual'nye problemy jenergosberezhenija i jenergojeffektivnosti v

- tehnicheskikh sistemah: lekcii 2-j Mezhdunar. konf. s jelementami nauchnoj shkoly. – Tambov: Izd-vo Pershina R.V., 2015. – S. 84–92.
7. *Knjazhevskaja G.S., Firsova M.G., Kil'keev R.Sh.* Vysokochastotnyj nagrev dijelektricheskikh materialov / pod red. *A.N. Shamova*. – 2-e izd., pererab. i dop. – L.: Mashinostroenie, 1989. – 64 s.
 8. *Alpert Y., Jerby E.* Coupled thermal-electromagnetic model for microwave heating of temperature-dependent dielectric media // *IEEE Transactions on plasma science*. – 1999. – Vol. 27. – № 2. – P. 555–562.
 9. *Korenkov D.A.* Raspredelenie vnutrennih istochnikov teploty v processe sushki drevesiny vakuumno-dielektricheskim sposobom // *Jenergo- i resursosberezhenie – XXI vek: sb. nauch. tr. XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. internet-konf.* – Orel, 2015. – S. 89–94.
 10. *Jolly P., Turner I.* Non linear field solution of one dimensional microwave heating // *Journal of microwave power and electromagnetic energy*. – 1990. – Vol. 25. – № 1. – P. 3–15.
 11. *D'jakonov K.F., Gorjaev A.A.* Sushka drevesiny tokami vysokoj chastoty. – M.: Lesn. prom-st', 1981. – 168 s.
 12. *Torgovnikov G.I.* Dielectric properties of wood and wood based materials. – Berlin: Springer Verlag, 1993. – 194 p.
 13. *Spravochnik po sushke drevesiny / E.S. Bogdanov, V.A. Kozlov, V.B. Kuntyshev [i dr.].* – 4-e izd., pererab. i dop. – M.: Lesn. prom-st', 1990. – 304 s.

