

2. Mehanizacija tehnologicheskikh processov zhivotnovodstva / A.A. Kurochkin, V.N. Strigin, S.I. Shherbakov [i dr.] // Programma dlja vysshih sel'skohozjajstvennyh uchebnyh zavedenij. – M., 1998.
3. Shherbakov S.I., Konovalov V.V., Dmitriev V.F. Mehanizacija tehnologicheskikh processov zhivotnovodstva. – Penza, 2006.
4. Poljakova A.A., Kashirin D.E., Miljutin M.A. Obzor sovremennyh tehnikeskikh sredstv dlja prigotovlenija i razdachi kormov i puti ih sovershenstvovanija // Mat-ly mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodyh uchenyh. – Irkutsk, 2015. – S. 216–221.
5. Utolin V.V., Grishkov E.E. Klassifikacija dozatorov kormov // Sb. nauch. tr. prepodavatelej i aspirantov RGATU im. P.A. Kostycheva. – Rjazan', 2012. – S. 100–103.
6. Konstruktivno tehnologicheskie parametry spiral'nogo smesitelja / V.V. Utolin, E.E. Grishkov, A.A. Poljakova [i dr.] // Sel'skij mehanizator. – Rjazan', 2015. – № 1.
7. Utolin V.V., Grishkov E.E., Lavrov A.M. Teoreticheskoe obosnovanie konstruktivno – tehnologicheskikh parametrov spiral'nogo smesitelja // Vestn. RGATU. – Rjazan', 2015. – № 7. – S. 28–29.
8. Hmyrov V.D., Mironov V.V. Jeksperimental'nye issledovanija po opredeleniju poristosti kompostiruemoj smesi // Estestvennye i tehnologicheskie nauki. – 2003. – № 1 (4). – S. 83–88.
9. Mel'nikov S.V., Roshhin P.M., Aleshkin V.R. Planirovanie jeksperimenta v issledovanijah sel'skohozjajstvennyh processov. – L.: Kolos, 1980. – 168 s.



УДК 674.047.3-047.58

*А.Н. Качанов, Д.А. Коренков*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРЕВА  
ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСИНЫ В ВАКУУМНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЕ**

*A.N. Kachanov, D.A. Korenkov*

**MODELLING OF PROCESS OF HIGH-FREQUENCY HEATING OF WET TIMBER IN THE VACUUM  
DIELECTRIC DRYING CHAMBER**

**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. Tech. 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 диэлектрического нагрева при сушке древесины в вакуумно-диэлектрических сушильных камерах. Так как размеры загрузки обычно соизмеримы с длиной электромагнитной волны, распределение электромагнитного поля приобретает волновой характер. Неоднородность поля является причиной неравно-*

*мерности температуры по длине загрузки. В результате неравномерного нагрева и сушки образуются дефекты, снижающие качество высушенного пиломатериала и увеличивающие брак продукции. В итоге увеличиваются удельные затраты электроэнергии на сушку, которые и так высоки для данного типа камер. Конечной целью исследования является*

повышение энергоэффективности вакуумно-диэлектрических камер, для чего необходимо более глубокое изучение процессов высокочастотного нагрева и сушки. Для теоретического изучения нагрева древесины в вакуумно-диэлектрической камере разработана двухмерная математическая модель, которая учитывает указанные волновые явления и зависимость теплофизических и диэлектрических свойств материала от температуры и влагосодержания. При численном моделировании принято, что токопроводы подключены к электродам посередине, поэтому расчет производится только для одной симметричной части. В статье иллюстрируются результаты решения разработанной модели методом конечных элементов при разном влагосодержании материала и разной частоте поля. Распределения внутренних источников теплоты и температуры проводятся для различных моментов времени нагрева в диапазоне от 0 до 30 мин. Анализ результатов показывает, что наиболее равномерный нагрев можно осуществить на частоте 1,73 МГц, но низкая интенсивность процесса технологически нежелательна. Высокая интенсивность достигается на частоте 13,56 МГц, но сопровождается неравномерностью нагрева.

**Ключевые слова:** высокочастотный нагрев, математическая модель, вакуумно-диэлектрическая сушка, распределение напряженности электрического поля.

*In the study questions of high-frequency dielectric heating when drying wood in vacuum and dielectric drying chambers were considered. As the amount of loading was usually commensurable with the length of an electromagnetic wave, electromagnetic field distribution gained wave character. Heterogeneity of a field was the reason of unevenness of temperature on the loading length. As a result of uneven heating and drying the defects reducing quality of dried-up timber and increasing flaw of production were formed. As a result specific costs of the electric power of drying which were so high for this type of chambers increased. An ultimate goal of research was the increase of energy efficiency of vacuum and dielectric chambers requiring deeper studying of processes of high-frequency heating and drying. Two-dimensional mathematical*

*model considering the specified wave phenomena and dependence of heat and physical and dielectric properties of material on temperature and moisture content was developed for theoretical studying of wood heating in vacuum and dielectric chamber. At numerical modeling it was accepted that current distributors were connected to electrodes in the middle therefore calculation was made only for one symmetric part. In the study the results of the solution of the developed model were illustrated by final elements method at different moisture content of material and different frequency of the field. Distributions of internal sources of warmth and temperature were carried out for various time points of heating in the range from 0 to 30 min. The analysis of the results showed that the most uniform heating can be carried out at the frequency of 1.73 MHz, but low intensity of process was technologically undesirable. High intensity was reached at the frequency of 13.56 MHz, but was followed by unevenness of heating.*

**Keywords:** high-frequency heating, mathematical model, vacuum and dielectric drying, distribution of intensity of electric field.

**Введение.** Диэлектрический нагрев в высокочастотном (далее ВЧ) электромагнитном поле получил широкое применение в промышленности благодаря более высокой скорости нагрева по сравнению с конвективным, кондуктивным и радиационным способами подведения тепла, а также одновременному повышению температуры во всем объеме тела.

Особое положение высокочастотный диэлектрический нагрев занимает при обработке древесины. Сушка стала одной из первой областей его промышленного применения. Впоследствии развитие получили конвективно-диэлектрические и вакуумно-диэлектрические (далее ВД) сушильные камеры [1]. Последние с точки зрения качества и скорости сушки более предпочтительны, но имеют общий недостаток – большой разброс конечной влажности из-за неравномерного распределения внутренних источников теплоты и, как следствие, неравномерного нагрева [2]. Причина неравномерности состоит в возникновении в рабочем конденсаторе волновых процессов, которые зависят от соотношения габаритов загрузки и частоты источника, а также диэлектрических свойств древесины.

**Цель исследования:** изучение влияния параметров высокочастотного источника и свойств загрузки на равномерность нагрева.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие **задачи:** разработать математическую модель, описывающую ВЧ-нагрев материалов с анизотропными переменными свойствами с учетом волновых процессов; исследовать полученную модель.

**Методы и результаты исследования.** Рассмотрим особенности ВЧ-нагрева древесины в

ВД-камере, изображенной на рисунке 1. При вертикальном расположении электродов 1 штабель формируется из горизонтальных рядов досок 2, укладываемых через прокладки 3. Если электроды максимально плотно прилегают к штабелю, а вертикальные промежутки между досками (шпации) отсутствуют, то в силу ортогональности электродов и границ раздела древесина-воздух напряженность электрического поля  $E$ , В/м, в каждом слое должна быть одинаковой и равной:

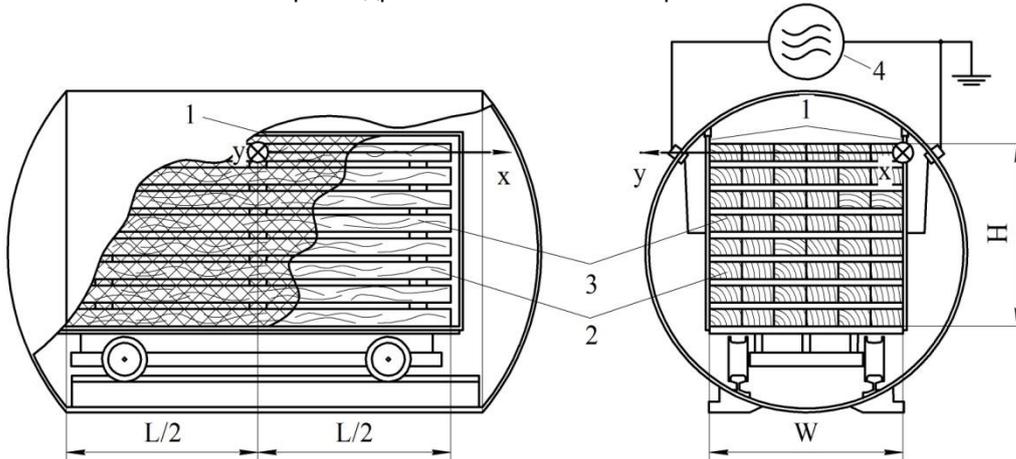


Рис. 1. Конструкция вакуумно-диэлектрической камеры и выбор системы координат: 1 – электроды; 2 – пиломатериал (доски); 3 – прокладки; 4 – высокочастотный генератор

$$E = \frac{U}{W}, \quad (1)$$

где  $U$  – выходное напряжение генератора, В;  $W$  – расстояние между электродами, м. Однако электромагнитное поле не является однородным, что обусловлено волновыми явлениями. Наиболее ярко это проявляется по длине штабеля, которая обычно составляет  $6 \div 6,5$  м и соизмерима с длиной электромагнитной волны  $\lambda$  во влажной древесине. Волновой характер распределения  $E$  описывается дифференциальным уравнением Гельмгольца [3]. Пренебрегая изменениями ЭМП по ширине и высоте штабеля, перепишем его в одномерной форме с учетом выбранной системы координат (см. рис. 1):

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

где  $\tilde{k}$  – (волновой) коэффициент распространения электромагнитной волны, 1/м. В (2) учтено, что волновой коэффициент неоднороден и зависит от диэлектрических свойств древесины,

которые являются функциями температуры и влагосодержания, а последние зависят от координаты:

$$\begin{aligned} \varepsilon(x) &= \varepsilon(T(x), u(x)), \quad \text{tg} \delta(x) = \text{tg} \delta(T(x), u(x)), \\ \tilde{k}(x) &= j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon(x) (1 - j \cdot \text{tg} \delta(x))}, \end{aligned}$$

где  $f$  – рабочая частота генератора, Гц;  $\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$  – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\delta$  – угол диэлектрических потерь;  $T$  – температура, °С;  $u$  – влагосодержание, кг/кг. Принимаем, что токопроводы подключены к электродам по центру. В точке подключения задаем граничное условие [4], коэффициент перед  $\dot{E}_0$  принимаем равным единице:

$$\frac{\partial \dot{E}(0)}{\partial x} = \tilde{k}(0) (\dot{E}(0) - 1 \cdot \dot{E}_0), \quad (3)$$

где  $\dot{E}_0$  – амплитуда падающей волны, В/м, определяется по (1). На границе справа ставим условие симметрии:

$$\frac{\partial \dot{E}(L/2)}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Правое граничное условие найдено авторами эвристически. Решив задачу (2)–(4), находим функцию  $\dot{E}(x)$  и получаем распределение удельной мощности тепловой энергии, Вт/м<sup>3</sup>, выделяющейся в материале:

$$Q_v = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon(x) \operatorname{tg} \delta(x) |\dot{E}(x)|^2. \quad (5)$$

При нагреве внутри влажной древесины начинают происходить процессы тепломассопереноса, описываемые системой уравнений А.В. Лыкова [5], решение которой известно своей сложностью. Для упрощения считаем, что нагрев происходит гораздо быстрее, чем изменение поля влагосодержания, т. е. распределение влагосодержания в древесине равномерно и одинаково в любой момент времени. Это позволяет не учитывать перекрестные эффекты тепломассопереноса. Если начальное влагосодержание одинаково во всем штабеле, то одинаковой будет картина электромагнитного поля в каждом ряде досок, тогда процесс нагрева достаточно рассмотреть только для одного ряда. Электромагнитное поле симметрично относительно точек подключения, поэтому симметричным будет и температурное поле. С учетом этого тепловая задача описывается дифференциальным уравнением теплопроводности с внутренними источниками тепла (6), дополненным граничными условиями симметрии (7) и конвективного теплообмена (8)–(10), а также начальными условиями (11) и (12):

$$c(T, u) \rho(T, u) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x(T, u) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_y(T, u) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y}) + Q_v(x), \quad (6)$$

$$\lambda_x(T, u) \frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

$$\lambda_x(T, u) \frac{\partial T(L/2, y, \tau)}{\partial x} = \alpha(T)(T(L/2, y, \tau) - T_{cp}), \quad (8)$$

$$-\lambda_y(T, u) \frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = \alpha(T)(T(x, 0, \tau) - T_{cp}), \quad (9)$$

$$\lambda_y(T, u) \frac{\partial T(x, B, \tau)}{\partial y} = \alpha(T)(T(x, B, \tau) - T_{cp}), \quad (10)$$

$$T(x, y, 0) = T_0 = \text{const}, \quad (11)$$

$$u(x, y, \tau) = u_0 = \text{const}, \quad (12)$$

где  $c$  – теплоемкость, Дж/(кг·°C);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, с;  $\lambda_x$  и  $\lambda_y$  – теплопроводность древесины вдоль и поперек волокон соответственно, Вт/(м·°C);  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $T_{cp}$  – температура окружающей среды, °C;  $T_0$  – начальная температура материала, °C;  $u_0$  – начальное влагосодержание древесины, кг/кг.

Совместная задача (2)–(12) решалась методом конечных разностей с использованием чисто неявной локально-одномерной схемы, построенной интегро-интерполяционным способом [6]. Моделирование производилось для штабелей длиной  $L = 6$  м, шириной  $W = 1$  м при значении выходного напряжения генератора 5 кВ на частотах 1,78 и 13,56 МГц. Порода древесины – сосна с базисной плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> и с начальным влагосодержанием 0,12 и 0,6 кг/кг. Числа узлов пространственной сетки приняты равными  $N_x = 40$  и  $N_y = 40$ , временной –  $N_\tau = 100$ , время нагрева – 30 мин. Функциональные зависимости теплофизических свойств сосны от температуры и влагосодержания получены путем интерполяции по данным [7], а диэлектрических свойств – по данным [8]. Коэффициент конвективного теплообмена, в соответствии с [4], принят равным 5 Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Результаты вычислений приведены на рисунках 2 и 3.

На рисунке 2 прослеживаются основные закономерности высокочастотного нагрева. Максимальная скорость нагрева наблюдается при частоте генератора 13,56 МГц (рис. 2, а, б), минимальная – при частоте 1,76 МГц (рис. 2, в, г). С повышением влажности эта скорость еще больше возрастает, так как коэффициент диэлектрических потерь  $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$  для сосны с влагосодержанием 0,12 и 0,6 кг/кг отличается более чем в 10 раз. Во всех случаях скорость нагрева изменяется незначительно на протяжении всего расчетного времени, а ее средние значения находятся в диапазоне от 0,054 °C/мин (рис. 2, в) до 1,8 °C/мин (рис. 2 б).

Распределение внутренних источников теплоты, а следовательно, и температуры наиболее равномерно при частоте 1,76 МГц. На характер распределения в большей степени оказывает влияние влажность, поскольку с ее ростом увеличивается коэффициент затухания  $\operatorname{Re}(\tilde{k})$ . При влагосодержании 0,12 кг/кг разница

между максимальной и минимальной температурами через 30 мин составляет 0,11 °С (рис. 2, в), а при 0,6 кг/кг – 3,1 °С (рис. 2, г). Температура несущественно сказывается на характере распределения источников тепла, но влияет на их величину. Например, через 30 мин нагрева на частоте 1,76 МГц температура в точке  $x = 2$  м

поднялась на 12 °С, мощность внутренних источников теплоты при этом увеличилась на 11 % (рис. 2, в). Однако при достаточно большом изменении температуры максимум  $Q_v$  смещается относительно начального положения (рис. 2, б).

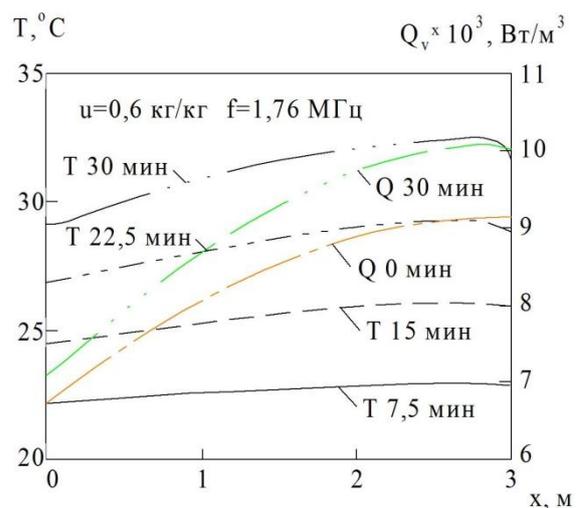
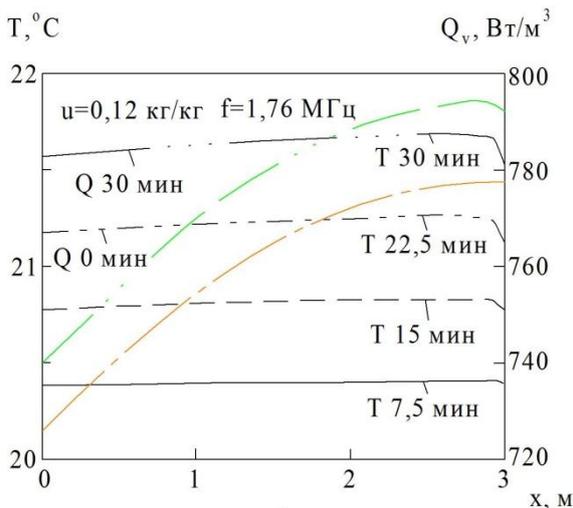
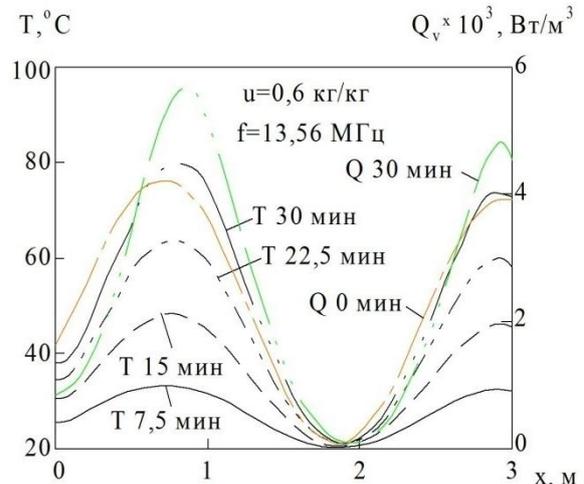
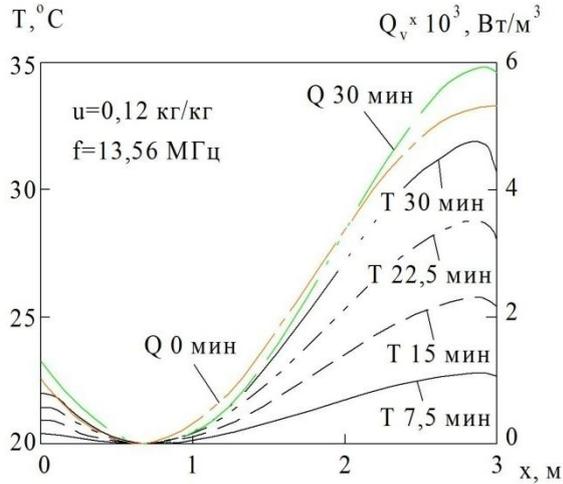


Рис. 2. Распределение температуры и мощности внутренних источников теплоты по длине штабеля при  $y = B/2$  в разные моменты времени при нагреве на частотах 1,76 и 13,56 МГц и влагосодержании древесины 0,12 и 0,6 кг/кг

Неравномерный нагрев характерен для частоты 13,56 МГц, при которой по длине рабочего конденсатора возникают узлы и пучности напряжения. Это приводит к тому, что в древесине образуются полностью непрогретые области (рис. 2, а, б), а разница между максимальной и минимальной температурами через 30 мин достигает  $\Delta t = 62,4$  °С (рис. 2, б). Такое явление может служить причиной механических деформаций и повреждений пиломатериала в

процессе сушки. Чтобы снизить неравномерность, рекомендуется подключать электроды к высокочастотному генератору 4 (рис. 1) в нескольких точках [3]. Для изучения этого эффекта авторами разработана соответствующая модель. Результаты вычислений нагрева штабеля с влагосодержанием 0,12 кг/кг на частоте 13,56 МГц при подключении в трех точках показаны на рисунке 3. Точкам подключения соответствуют координаты  $x = 0$  м и  $x = 2$  м. Из ана-

лиза результатов следует, что величина  $\Delta t$  сократилась до 22,3 °С, т.е. нагрев стал более равномерным, но этого недостаточно для качественной сушки. Дальнейшее увеличение числа точек подключения приводит к усложне-

нию конструкции вакуумной камеры, поэтому для обеспечения равномерности в данном примере следует выбрать частоту 5,28 МГц ( $\Delta t = 1,3$  °С при  $u = 0,12$  кг/кг и  $\Delta t = 12,9$  °С при  $u = 0,6$  кг/кг).

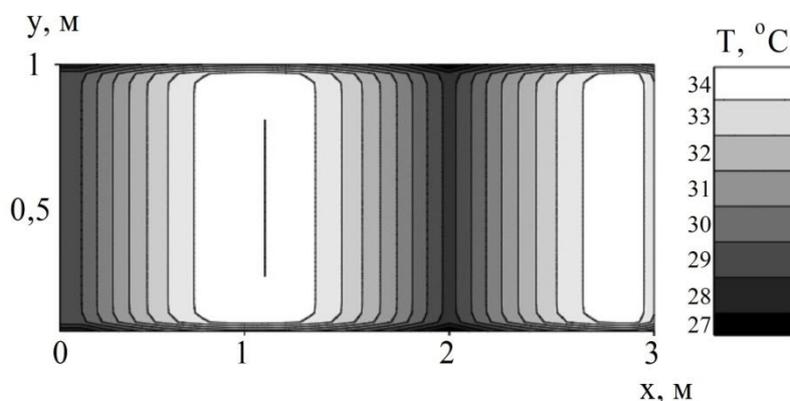


Рис. 3. Температурное поле при нагреве на частоте 13,56 МГц и при подключении электродов в 3 точках

Для анализа процессов диэлектрического нагрева разработано множество математических моделей. Общим для них является использование уравнения теплопроводности Фурье. Особенности каждой модели заключаются в распределении внутренних источников теплоты. В одних процессах ВЧ-нагрева электрическое поле можно считать однородным [9], тогда напряженность электрического поля находится по формуле (1), в других – квазистационарным, тогда применяется уравнение Лапласа [10]. Необходимость учета волновых явлений обычно возникает в задачах СВЧ-нагрева [11], для которых решение может быть получено разными способами, в том числе и путем численного расчета уравнения Гельмгольца, но специфика

СВЧ-энергии заставляет применять иные граничные условия. В нашем случае для сравнения наиболее подходит закон распределения, известный из [12]:

$$\dot{E}(x) = \dot{E}_0 \cos(\beta(L_x/2 - x)), \quad (13)$$

где  $\beta = \text{Im}(\tilde{k})$  – коэффициент фазы, 1/м.

Расчет системы (5)–(13) проведен при влажности 0,6 кг/кг и частоте 13,56 МГц. На рисунке 4 показаны кривые распределения источников теплоты в начальный момент времени «Q`0 мин» и в конце нагрева «Q`30 мин». Для удобства анализа здесь также воспроизведены кривые «Q0 мин» и «Q30 мин» рисунка 2, б.

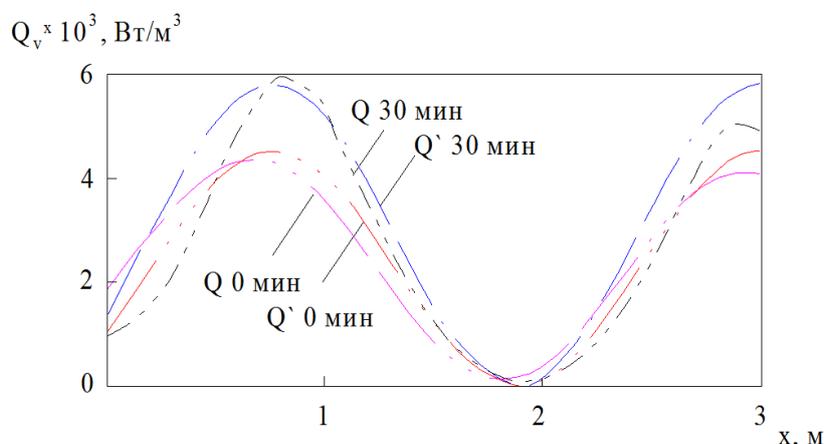


Рис. 4. Результаты расчетов предлагаемой модели (2)–(12) и ранее известной модели (5)–(13)

В целом система (5)–(13) дает схожий результат, но для возможности использования (13) необходимо усреднять диэлектрические свойства материала по всему объему на каждом шаге по времени, что вносит погрешность в расчет. Дополнительная погрешность возникает из-за того, что (13) опускает действительную составляющую волнового коэффициента  $\alpha = \operatorname{Re}(\tilde{k})$ , т. е. затухание электромагнитной волны не учитывается. Особенно сильно это проявляется на свободном краю конденсатора ( $x = 3$  м), где расчетные значения в конце нагрева отличаются на 20 % (рис. 4).

**Выводы.** На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы:

- предложена математическая модель, представляющая собой связанную нестационарную задачу электродинамики и теплопроводности в среде с анизотропными температуро- и влагонезависимыми свойствами, описывающая ВЧ нагрев древесины в ВД камере с учетом волновых процессов;

- модель может быть использована для исследования иных процессов ВЧ нагрева различных длинномерных материалов в плоских конденсаторах без воздушных зазоров;

- модель позволяет выбрать оптимальные напряжение и частоту генератора, обеспечивающие достаточную равномерность и высокую скорость нагрева при безопасном для материала значении напряженности электрического поля;

- исследование полученной модели показало, что равномерность температуры по длине штабеля достигается на частоте 1,76 МГц, однако скорость нагрева низка; при длине штабеля соснового пиломатериала 6 м рационально проводить нагрев на частоте 5,28 МГц; на частоте 13,56 МГц скорость максимальна, но температура неоднородна даже при подключении электродов в нескольких точках.

### Литература

1. Качанов А.Н., Сальников В.Г., Чукумов М.Н. Техничко-экономический анализ способов сушки древесины // Проблемы энергетики Казахстана. – Алматы: Гылым, 1994. – С. 60–61.
2. Болдырев П.В. Сушка древесины: Практическое руководство. – СПб.: Проффикс, 2002. – 156 с.
3. Завадский Ю.В. Моделирование волновых процессов. – М.: Наука, 1991. – 248 с.

4. 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.
5. Комаров В.В. Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных волн с дисспативными средами в СВЧ-нагревательных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – № 4. – С. 57–63.
6. Дульнев Г.Н., Парфёнов В.Г., Сигналов А.В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1990. – 207 с.
7. Справочник по сушке древесины / Е.С. Богданов, В.А. Козлов, В.Б. Кунтыш [и др.]; под ред. Е.С. Богданова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 304 с.
8. Лесная энциклопедия: в 2 т. Т. 1 / гл. ред. Г.И. Воробьев; ред. кол.: Н.А. Анучин, В.Г. Атрохин, В.Н. Виноградов [и др.]. – М.: Сов. энциклопедия, 1985. – 563 с.
9. High-frequency heating behavior of veneer-based composites: modeling and validation / P. Wey, B.J. Wang, C. Dai [et al.] // BioResources. – 2014. – № 9(2). – P. 3304–3322.
10. Petrescu C., Ferariu L. Modeling of dielectric heating in radio-frequency applicator optimized for uniform temperature by means of genetic algorithms // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. – 2008. – № 2(11). – P. 3668–3673.
11. Jolly P., Turner I. Nonlinear field solution of one dimensional microwave heating // Journal of microwave power and electromagnetic energy. – 1990. – Vol. 25, № 1. – P. 3–15.
12. 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. Ленингр. отд-ние, 1989. – 64 с.

### Literatura

1. Kachanov A.N., Sal'nikov V.G., Chukumov M.N. Tehniko-jekonomicheskiy analiz sposobov sushki drevesiny // Problemy jenergetiki Kazahstana. – Almaty: Gylym, 1994. – S. 60–61.
2. Boldyrev P.V. Sushka drevesiny: Praktich-

- eskoe rukovodstvo. – SPb.: Profiks, 2002. – 156 s.
3. *Zavadskij Ju.V.* Modelirovanie volnovykh processov. – M.: Nauka, 1991. – 248 s.
4. *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.
5. *Komarov V.V.* Formulirovki matematicheskikh modelej processov vzaimo-dejstvija jelektromagnitnykh voln s dissipativnymi sredami v SVCh-nagrevatel'nykh sistemah // Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy. – 2010. – T. 13. – № 4. – S. 57–63.
6. *Dul'nev G.N., Parfjonov V.G., Signalov A.V.* Primenenie JeVM dlja reshenija zadach teploobmena: ucheb. posobie dlja vuzov. – M.: Vyssh. shk., 1990. – 207 s.
7. Spravochnik po sushke drevesiny / *E.S. Bogdanov, V.A. Kozlov, V.B. Kuntysch* [i dr.]; pod red. *E.S. Bogdanova*. – 4-e izd., pererab. i dop. – M.: Lesn. prom-st', 1990. – 304 s.
8. Lesnaja jenciklopedija: v 2 t. T. 1 / gl. red. *G.I. Vorob'ev*; red. kol. *N.A. Anuchin, V.G. Atrohin, V.N. Vinogradov* [i dr.]. – M.: Sov. jenciklopedija, 1985. – 563 s.
9. High-frequency heating behavior of veneer-based composites: modeling and validation / *P. Wey, B.J. Wang, C. Dai* [et al.] // BioResources. – 2014. – № 9(2). – P. 3304–3322.
10. *Petrescu S., Ferariu L.* Modeling of dielectric heating in radio-frequency applicator optimized for uniform temperature by means of genetic algorithms // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. – 2008. – № 2(11). – P. 3668–3673.
11. *Jolly P., Turner I.* Nonlinear field solution of one dimensional microwave heating // Journal of microwave power and electromagnetic energy. – 1990. – Vol. 25, № 1. – P. 3–15.
12. *Knjazhevskaja G.S., Firsova M.G., Kil'keev R.Sh.* Vysokochastotnyj nagrev dijelektri-cheskikh materialov / pod red. *A.N. Shamova*. – 2-e izd., pererab. i dop. – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1989. – 64 s.

