

УДК 532.613

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ В ОБРАЗЦАХ ПИЛОМАТЕРИАЛА ПРИ НАГРЕВЕ ЭНЕРГИЕЙ СВЧ-ПОЛЯ ЧАСТОТОЙ 2,45 ГГц

канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ, канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ,
Т.А. БУЛЬБЕНКОВА

(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрена электродинамическая задача прямого и углового падения СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц от волноводно-щелевой антенны на полубесконечную пластину с диэлектрическими характеристиками, соответствующими древесине при перпендикулярной ориентации вектора напряженности падающего поля относительно волокон. Рассмотрена задача облучения энергией СВЧ-поля пластины конечной толщины в режиме стоячей волны, образованной отражением от металлической поверхности, размещенной за пластиной. Проведено численное решение поставленных задач методом конечных элементов в двумерной области. Представлены и проанализированы результаты моделирования – зависимость глубины проникновения выделяемой тепловой мощности в пластину и коэффициента отражения СВЧ-поля от ее влагосодержания, температуры и угла наклона облучающей антенны. Показано распределение тепловой мощности в сечении пластин различной толщины, соответствующей толщине пиломатериалов стандартных сортиментов.

Введение. Нагрев и сушка влажных материалов электромагнитным полем сверхвысокой частоты (СВЧ) имеет свои преимущества для быстрого разогрева и сушки различных пиломатериалов – досок, брусков, бруса, бревен. Особенностью СВЧ-нагрева является получение таких градиентов температуры, давления пара и влагосодержания в объекте сушки, которые приводят к интенсификации прогрева и сушки, в частности к механическому выбросу части влаги в жидкой фазе, чего не достигается при обычной конвекционной сушке, кроме того при СВЧ-сушке происходит антисептическая обработка.

В настоящее время активно ведется разработка сушилок пиломатериалов с нагревом энергией СВЧ-поля. Применяемые в таких сушилках мощные магнетроны, которые генерируют СВЧ-волны частотой 416 или 915 МГц с полезной мощностью 25...100 кВт, весьма дорогостоящие. Например, стоимость магнетрона мощностью 25 кВт с источником питания составляет около 25 тыс. долл. США. Доступные маломощные магнетроны на частоту 2,45 ГГц (2,465 ГГц) гораздо дешевле. Разработка СВЧ-сушилок на таких магнетронах для сушки пиломатериалов различных сортиментов – перспективное направление. Для обеспечения равномерного прогрева материалов энергией СВЧ-поля критическим является глубина проникновения электромагнитного поля в материал.

Цель данной работы – оценка глубины проникновения тепловой энергии СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц, возбуждаемого антенной, в пиломатериал в зависимости от его влажности и температуры, оценка величины отражений падающего СВЧ-поля, а также исследование распределения тепловой мощности в сечении пиломатериалов различных сортиментов при облучении их в режиме стоячей волны.

Экспериментальное измерение распределения напряженности и тепловой мощности СВЧ-поля в материалах при помощи зондов, термопар, полупроводниковых датчиков температуры и т.п. затруднено ввиду значительных искажений поля вблизи датчиков (вследствие отражения от них) и появления паразитных токов, вызванных электрическими наводками. В этих случаях физико-математическое моделирование с применением численных методов математической физики является основным инструментом для изучения сложных электродинамических, тепловых процессов и массообмена.

Постановка задачи прямого и углового падения СВЧ-поля на полубесконечную пластину. Рассмотрим электродинамическую задачу падения СВЧ-поля частотой $f = 2,45$ ГГц, возбуждаемого волноводно-щелевой антенной, на плоскую полубесконечную пластину (рис. 1).

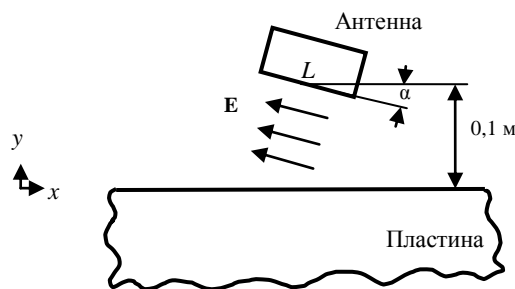


Рис. 1. Постановка электродинамической задачи

Распространение гармонической СВЧ-волны напряженностью электрического поля \mathbf{E} формулировалось в виде волнового уравнения Гельмгольца [1 – 3]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} \right) - \varepsilon \cdot k_0^2 \cdot \mathbf{E} = 0,$$

где ε , μ – комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; k – волновое число.

Для частоты $f = 2,45$ ГГц волновое число k_0 :

$$k_0 = 2\pi \cdot f / c = 51,5 \text{ рад/м},$$

где c – скорость света в вакууме, $3 \cdot 10^8$ м/с.

На внешних границах области моделирования задавалось согласованное граничное условие с волновым числом k_0 ; на границе источника – согласованное граничное условие, в котором задавались напряженность магнитного поля источника $H_0 = 1$ А/м и число k_0 ; на границе раздела сред – условие непрерывности. Длина и ширина пластины выбирались достаточно большими, с целью минимизации краевых эффектов и полного затухания СВЧ-волны в пластине.

Решение в двумерной области дифференциальных уравнений СВЧ-электродинамики с граничными и начальными условиями проводилось в специальном программном пакете методом конечных элементов.

Ориентация вектора напряженности \mathbf{E} электрического поля антенны принималась перпендикулярной волокнам древесины, что обеспечивает в 1,2...1,5 раза большую глубину проникновения СВЧ-поля в древесину по сравнению с ориентацией вектора напряженности параллельно волокнам за счет более низкого значения диэлектрических потерь. Диэлектрическая проницаемость образца при перпендикулярной ориентации вектора напряженности падающего поля $\varepsilon = \varepsilon_{\perp} = \varepsilon'_{\perp} - j\varepsilon''_{\perp}$ принималась согласно [4] в зависимости от влагосодержания древесины u и температуры T . Предполагалось, что распределение влаги и температуры по сечению пластины равномерное. Расчеты производились для влагосодержаний 0,8, 0,6 и 0,3 кг/кг при температуре 20 и 80 °С.

В результате моделирования определялись глубина проникновения в образец половинной мощности $h^{0,5}$ (м), интегральная тепловая мощность поглощенная пластиной Q (Вт) и рассчитывался коэффициент отражения $S_{\text{отр}}$:

$$Q = \int_V 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' \cdot |\mathbf{E}|^2; \quad S_{\text{отр}} = \sqrt{P_{\text{отр}}/P_0}; \quad P_{\text{отр}} = P_0 - P_{\text{погл}},$$

где P_0 – мощность СВЧ-волны, излучаемой антенной, которая определялась исходя из заданной протяженности излучателя СВЧ-поля L , в качестве которого принималась ширина щелевой антенны 0,09 м для частоты 2,45 ГГц и некоторой заданной напряженности магнитного поля излучателя $H_0 = 1$ А/м по выражению:

$$P_0 = L \cdot 0,5 \cdot E_0^2 / 377 = L \cdot 0,5 \cdot 377 \cdot H_0^2.$$

Прямое падение СВЧ-волны на пластину. Вначале рассматривалось прямое падение СВЧ-волны от антенны при $\alpha = 0$ на полубесконечную пластину. Согласно результатам моделирования напряженность электрического поля в пластине убывает с увеличением расстояния y от поверхности вглубь пластины по экспоненциальному закону $e^{-\beta \cdot y}$, где β – коэффициент распространения, что соответствует теории электродинамики, а выделяемая тепловая мощность – по закону $e^{-2\beta \cdot y}$. Глубина проникновения $h^{0,5}$ половинной тепловой мощности и коэффициент отражения $S_{\text{отр}}$ представлены на рисунке 2.

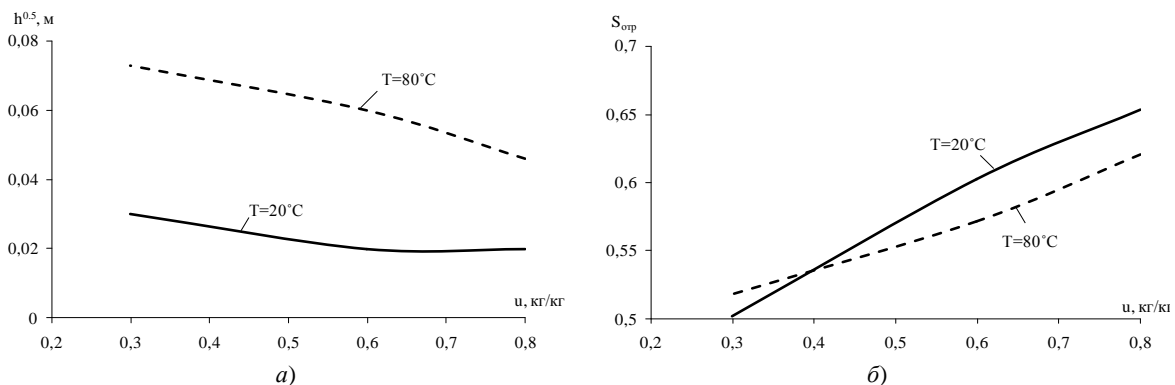


Рис. 2. Глубина проникновения $h^{0,5}$ половинной мощности в образец (а) и зависимость коэффициента отражения СВЧ-поля $S_{\text{отр}}$ от образца (б) в зависимости от его влагосодержания и температуры

Угловое падение СВЧ-волны на пластину. Рассматривалось угловое падение СВЧ-волны от антенны для углов α , равных 15, 30 и 45 градусов, на полубесконечную пластину. Результаты моделирования приведены на рисунке 3 а, б.

На рисунке 3, а показано распределение модуля вектора напряженности СВЧ-поля между антенной и пластиной и распределение мощности источников тепла Q в пластине, где видно образование стоячей волны между поверхностью пластины и антенной, а также затухание энергии СВЧ-поля в материале. С увеличением угла наклона антенны коэффициент отражения $S_{отр}$ уменьшается, что видно из рисунка 3, б.

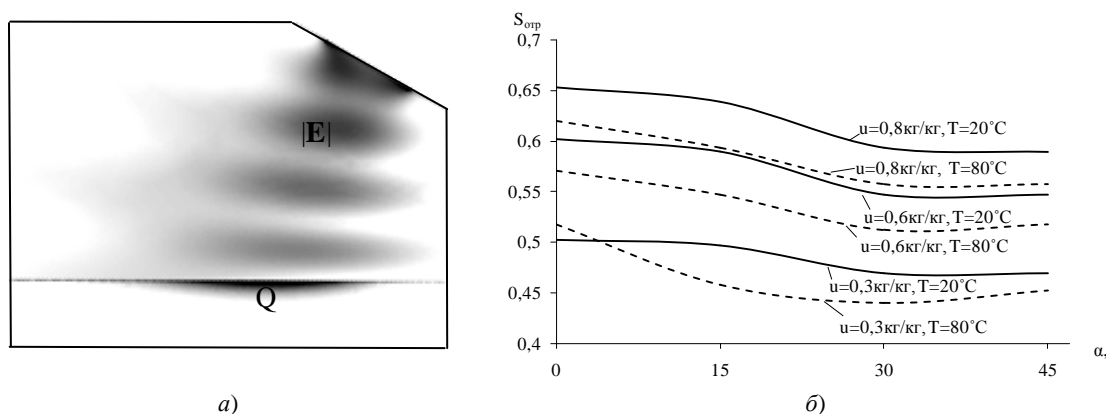


Рис. 3. Фрагмент картины распределения модуля напряженности СВЧ-поля E и мощности Q в образце с влажностью $u = 0,6 \text{ кг/кг}$, $T = 80^\circ\text{C}$, $\alpha = 30^\circ$ (а) и изменение коэффициента отражения $S_{отр}$ при изменении наклона антенны при разном влажностном содержании u и температуре T (б)

Постановка задачи прямого облучения СВЧ-полем пластины конечной толщины в режиме стоячей волны. При прямом СВЧ-облучении пластины распределение напряженности поля и, соответственно, выделяемой тепловой мощности по толщине доски будет формироваться как прошедшей волной, так и вторичными волнами, возникающими в результате многократных переотражений их от внутренних границ материала с образованием стоячих волн. Расположение объектов сушки над отражающей металлической поверхностью (поддоном) позволяет использовать волну, прошедшую объект, для его дополнительного нагрева.

Рассматривалась задача прямого падения СВЧ-волны (рис. 4) на пластину толщиной d , с отражающей поверхностью, размещенной на расстоянии $d' = \lambda/4 = 0,03 \text{ м}$ и $d' = \lambda/2 = 0,06 \text{ м}$ за пластиной, где λ – длина волны для частоты СВЧ-поля 2,45 ГГц, равная 0,122 м. Граничное условие для отражающей поверхности под пластиной задавалось как идеально проводящее.

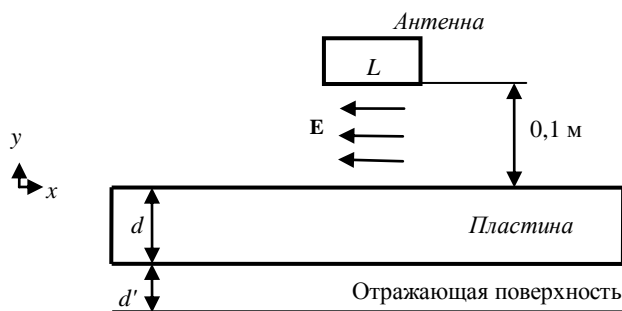


Рис. 4. Постановка электродинамической задачи нагрева пластины в режиме стоячей волны

Расчет распределения мощностей внутренних источников тепла в пластине выполнялся для стандартных сортов пиломатериалов 25, 40, 50 и 100 мм, с влажностью 0,8 и 0,6 кг/кг при температурах 20 и 80 °C и расположении отражающей поверхности на расстояниях $d' = \lambda/4 = 0,03 \text{ м}$ и $d' = \lambda/2 = 0,06 \text{ м}$ от пластины.

На рисунках 5 и 6 представлены результаты моделирования – картина распределения удельной мощности источников тепла Q в сечении пластины и значения коэффициентов отражения СВЧ-поля $S_{отр}$.

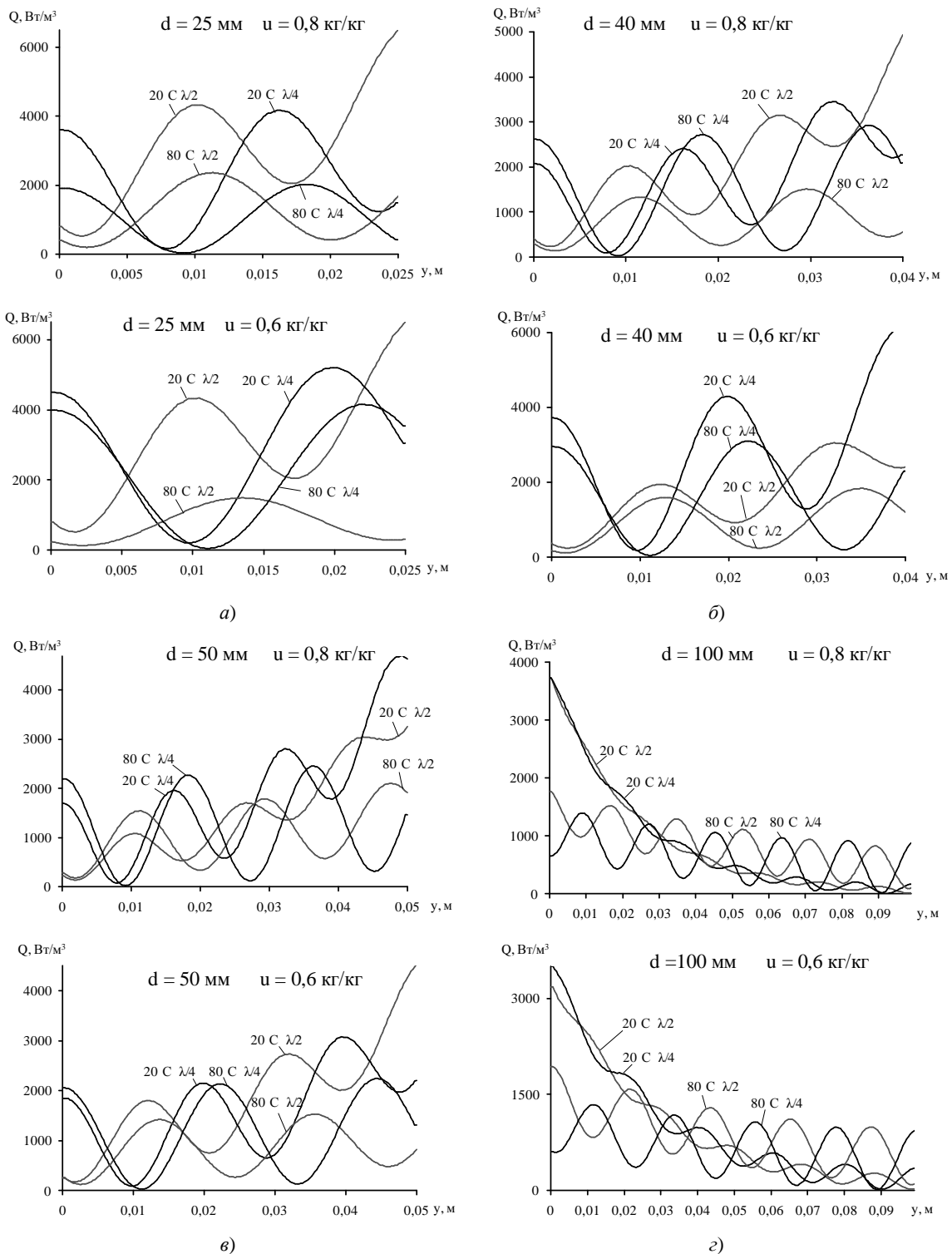


Рис. 5. Распределение мощности источников тепла Q в сечении пластины толщиной 25 мм (а), 40 мм (б), 50 мм (в), 100 мм (г) в зависимости от влагосодержания, температуры и расстояния до отражающей поверхности

Представленное на рисунке 5 распределение удельной тепловой мощности в сечении пластин различной толщины обусловлено наличием стоячих СВЧ-волн с максимумами и минимумами напряженности, образованных многократно отраженными волнами от внутренних границ самой пластины и отра-

жающей поверхности. В зависимости от расстояния d' , равного $\lambda/4$ или $\lambda/2$, максимумы выделяемой тепловой мощности также смещаются внутри пластины. Согласно рисунку 5 с начальным нагрев пластин толщиной 100 мм с влагосодержаниями 0,8 и 0,6 кг/кг будет крайне неравномерен вследствие значительного затухания волны на данной толщине пластины, поэтому тепловыделение будет локализовано в области пластины, близкой к стороне подвода СВЧ-энергии.

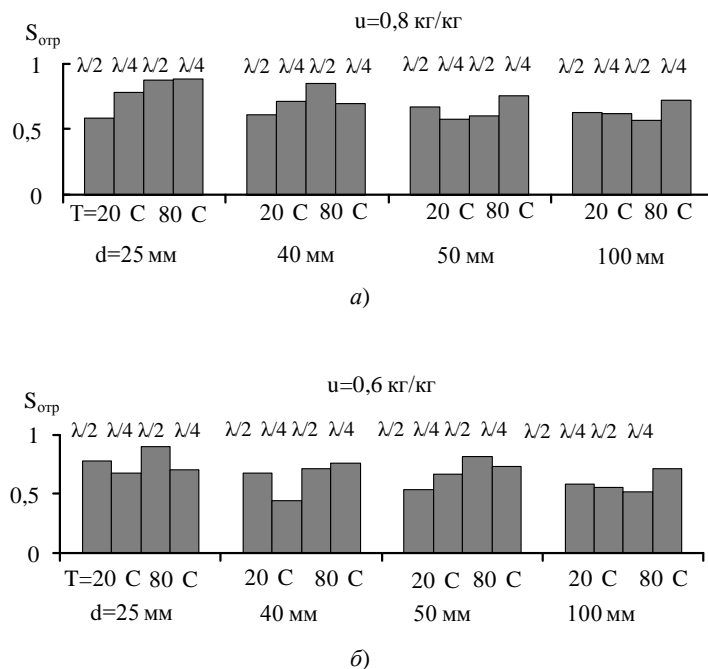


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения СВЧ-поля от пластин различной толщины от их температуры и расстояния до отражающей поверхности при влагосодержании 0,8 кг/кг (а) и 0,6 кг/кг (б)

Согласно рисунку 6 при облучении пластин до 50 мм с наличием отражающей поверхности коэффициент отражения в целом выше, чем при облучении пластины толщиной 100 мм, за счет волны, отраженной от поверхности. Более высокий коэффициент отражения наблюдается также при облучении пластин меньшего влагосодержания, кроме того коэффициент отражения зависит от расстояний d' , равных $\lambda/4$ или $\lambda/2$. Указанное увеличение коэффициента отражения обусловлено тем, что отраженная от поверхности волна не успевает затухнуть полностью на данной толщине образца.

Анализ результатов и заключение. Глубина проникновения СВЧ-поля в пиломатериал увеличивается с уменьшением его влагосодержания и увеличением температуры за счет снижения диэлектрических потерь. Например, согласно расчетам глубина проникновения половинной мощности в древесину влажностью 0,8 кг/кг при температуре 20 °С составляет примерно 0,02 м, в процессе прогрева до температуры 80 °С глубина увеличивается до 0,04 м. Прогрев влажной древесины СВЧ-полем частотой 2,45 ГГц с приемлемой степенью равномерности возможен лишь при незначительной ее толщине. Применение недорогих магнетронов с частотой 2,45 ГГц оправданно для нагрева пиломатериалов небольшой толщины и использования их в СВЧ-камерах с малым объемом загрузки.

При прямом падении СВЧ-волны на пиломатериал коэффициент отражения составляет 0,55...0,65 (25...40 % по мощности). При нагреве наблюдается снижение коэффициента отражения из-за уменьшения значений диэлектрических характеристик древесины ϵ'_1 и ϵ''_1 . Отраженная волна частично возвращается в тракт питания СВЧ-генератора, частично образует вторичные волны, отраженные от элементов технологической камеры.

При подводе СВЧ-энергии к материалу с наклоном антенны коэффициент отражения снижается на 10...20 %. Поэтому для СВЧ-нагрева можно рекомендовать углы наклона облучающих антенн 15...30 градусов относительно поверхности, что улучшит согласование тракта «источник – излучатель – материал» и уменьшит вторичные волны.

Нагрев пиломатериалов толщиной не более 50 мм возможен при одностороннем подводе энергии СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц. Для нагрева сортаментов сечением 100 мм и более (например, бруса 100 × 100 мм) целесообразен двухсторонний подвод СВЧ-энергии.

Более медленный прогрев древесины СВЧ-полем на стадии пропаривания до температуры сушки обеспечит большую равномерность распределения температуры и влагосодержания в сечении пиломатериала за счет инерционности тепловых процессов, а также фильтрационного переноса тепла с паром и жидкостью в более холодные участки капиллярно-пористого материала.

Распределение температурного поля в материалах на начальной стадии СВЧ-нагрева можно получить, решив уравнение теплопроводности. Для качественного и количественного изучения процессов тепломассообмена в материале, выбора приемлемых режимов сушки пиломатериалов при нагреве энергией СВЧ-поля необходимо решение электродинамической задачи совместно с системой уравнений тепломассообмена в капиллярно-пористых материалах с соответствующими краевыми и замыкающими соотношениями [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерофеенко, В.Т. Математические модели в электродинамике: курс лекций: в 2 ч. / В.Т. Ерофеенко, И.С. Козловская. – Минск: БГУ, 2008. – Ч. 2. – 167 с.
2. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – М.: Наука, 1989.
3. Кураев, А.А. Электродинамика и распространение радиоволн / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.К. Синицын. – Минск: Бестпринт, 2004. – 357 с.
4. Адамович, А.Л. Определение комплексной диэлектрической проницаемости древесины в СВЧ-диапазоне / А.Л. Адамович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2005. – № 10. – С. 37 – 43.
5. Моделирование процессов термовлагопереноса в капиллярно-пористых средах / С.П. Кундас [и др.]. – Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2007.

Поступила 30.01.2012

DISTRIBUTION OF HEAT ENERGY IN THE LUMBER SAMPLES DURING HEATING OF MICROWAVE POWER WITH FREQUENCY OF 2,45 GHZ

A. ADAMOVICH, Y. GROZBERG, T. BULBENKOVA

The electrodynamic problem of the direct and the angles of incidence of the microwave field of 2.45 GHz waveguide-slot antenna on a semi-infinite plate with a dielectric characteristics of the corresponding timber in the perpendicular orientation vector of the incident field with respect to the fibers are considered. The problem of radiation energy of the microwave field plate of finite thickness in the standing waves formed by reflection from a metal surface, placed over the plate are considered. The numerical solution of the tasks the finite element method in two-dimensional region. Presented and analyzed the results of modeling – the dependence of the penetration depth of thermal power released in the plate and the reflection coefficient of the microwave field from the plate, depending on its moisture content, temperature and angle of the incident antenna, as well as the distribution of thermal power in the cross section of plates of different thicknesses corresponding to the thickness of standard lumber assortments.