

sector] Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i este-stvennyh nauk [International journal of Humanities and natural Sciences], 2017, no. 11, pp. 6-11.

6. Bartashevich A.A., Bogush V.D. Konstruirovanie mebeli [Furniture design]. Minsk, Higher School, 1998. 343 p. ISBN 985-06-0233-3.

7. Arakelyan G. Matematika i Istorija Zolotogo Sechenija [Mathematics and History of the Golden Ratio]. Logos, 2014. 404 p. ISBN: 978-5-98704-663-0.

8. Lizoňová D. Luptáková J. Artistic analysis and geometric procedures in furniture designing. ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE ZVOLEN, 2016. Vol. 58(2). pp. 5-14. doi:10.17423/afx.2016.58.2.01

9. Elam K. Geometry of design: Studies in proportion and composition. New York: Princeton Architectural Press, 2011. 143 p. ISBN 978-16-1689-036-0.

10. Hejazi M. Geometry in nature and Persian architecture. Building and Environment. 2005. Vol. 40, Issue 10. pp.1413-1427. doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.11.007.

11. Shekhawat K. Why golden rectangle is used so often by architects: A mathematical approach. Alexandria Engineering Journal. 2015. Vol. 54, Issue 2. pp. 213-222. doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.012.

12. Practical furniture design. Newtown, CT: Taunton Press. 2009. 268 p. ISBN 978-1-60085-07.

13. Mutlu Danaci, H. Aesthetics in Cultural Landscape and Architectural Education. Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2015. Vol. 191. pp. 190–195. doi.: 10.1016/j.sbspro.2015.04.242.

14. Le Korbjuze [Misstyle Look] Available at: http://misstyle-look.blogspot.com/2012/01/blog-post_15.html (accessed 25 February 2022)

©Efimova T.V. – PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production, Mechanical Wood Technology department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VSUFT), e-mail: tanechka-ef@rambler.ru; Ishchenko T.L. – PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production, Mechanical Wood Technology department, VSUFT, e-mail: tl_ischenko@mail.ru; Efimenko S.M. – PhD in Pedagogical Sciences, Teacher of the highest qualification category at State budgetary professional educational institution of the city of Moscow «College of Architecture, Design and Reengineering No. 26», e-mail: svetlana@efimenko.su; Zaritovsky A.V. – student VSUFT, e-mail: tetanasty2001@gmail.com.

УДК 674.047.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВЧ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В ОСЦИЛЛИРУЮЩЕМ РЕЖИМЕ

А.И. Шагеева, П.А. Кайнов, Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин

Данная работа посвящена разработке математической модели процесса СВЧ сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме. В статье приведена формализация модели тепломассопереноса в условиях внутренней и внешней задачи процесса и апробация математической модели на адекватность. Представлены расчетные и экспериментальные зависимости изменения температуры центра и поверхности материала, а также влагосодержания древесины от давления в аппарате. По результатам физического моделирования была определена оптимальная схема проведения СВЧ сушки пиломатериалов. Установлено, что процесс СВЧ нагрева пиломатериалов в режиме осциллирующего давления среды может протекать при атмосферном давлении среды или с предварительным удалением газа из аппарата.

Ключевые слова: сушка, СВЧ нагрев, осциллирующий режим, древесина.

Введение

Процесс сушки является важнейшей составляющей технологии производства пиломатериалов, а также наиболее энергоемкой и трудоемкой операцией, во многом определяющей качество получаемого продукта. На сегодняшний день широко известны способы сушки древесины, осуществляемые в условиях вакуумных аппаратов с подводом тепловой энергии контактным или конвективным методами [1-10]. Каждый из этих способов обладает определенным рядом преимуществ и недостатков, однако для

всех этих методов наиболее важной остается проблема большой продолжительности процесса. В связи с этим, стремление к сокращению временных затрат подталкивает исследователей к поиску новых оптимальных технологий и оборудования для сушки древесины. Одним из таких перспективных направлений ведения процесса является использование в качестве источника тепловой энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ) [11-20]. В отличие от конвективных и кондуктивных методов сушки, при которых подвод тепловой энергии к материалу осуществляется через поверхность тела, СВЧ энергия позволяет интенсифицировать процесс за счет объемного нагревания материала, что позволяет создать градиент температуры, способствующий движению влаги к поверхности материала на протяжении всего процесса. Однако при СВЧ нагреве толстых сортиментов по сечению последних зачастую наблюдается неравномерность температуры, максимальное значение которой устанавливается не в центре материала, а в средних слоях. В этой связи исследование процессов СВЧ-сушки толстых сортиментов с целью повышения качества сушки является актуальной задачей.

В последние годы для решения задач по снижению себестоимости сушки без ущерба качеству пиломатериалов находят применение импульсные режимы. Применительно к вакуумным технологиям они получили развитие в виде осциллирующих режимов. Однако применительно к СВЧ-нагреву данные технологии пока не исследованы. Процесс сушки пиломатериалов при данном режиме состоит из последовательно чередующихся стадий нагрева материала и вакуумирования. Стадия нагрева, в случае применения в качестве источника тепловой энергии СВЧ поля, должна осуществляться с попеременной подачей электромагнитных волн при атмосферном давлении и осуществлением вакуумирования, сопровождаемого интенсивным удалением влаги из материала и снижением его температуры. Благодаря положительному действию градиентов температуры, давления и влажности происходит как равномерное влагоудаление по толщине пиломатериала, так и выравнивание температуры, что в свою очередь позволяет избежать критических напряжений и деформаций в процессе сушки.

Для достижения указанной цели была разработана математическая модель процесса сушки пиломатериалов в СВЧ поле, а также проведены исследования на экспериментальной сушильной установке для проверки модели на адекватность.

Методы и материалы

Предметом настоящего исследования является математическая модель процесса СВЧ сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме.

Введение импульсного режима нагрева, состоящего из попеременных стадий СВЧ нагрева и вакуумирования, позволяет без использования водяного пара сохранять качественные характеристики высушиваемых пиломатериалов, снижая при этом внутренние напряжения в древесине.

Для построения математической модели были приняты следующие допущения:

1. исходный материал имеет равные по сечению значения температуры, влажности и давления;
2. удаляемая из капиллярнопористого коллоидного материала в процессе сушки жидкость представляет собой дистиллированную воду и имеет соответствующие теплофизические свойства;
3. пары, ввиду протекания процесса в условиях пониженного давления, подчиняются законам идеальных газов;
4. значение влагосодержания поверхности пиломатериала, равновесное текущему значению давления над ней, устанавливается мгновенно; в связи с этим влагосодержание поверхности тела в ходе процесса будет оставаться все время равновесным по отношению к текущему парциальному давлению водяного пара над материалом при соответствующей температуре его поверхности;
5. процесс переноса тепла и массы в высушиваемом материале рассмотрим, как одномерную симметричную задачу.

Математически процесс сушки пиломатериалов в вакуумной СВЧ установке описан нами следующим образом.

При сушке пиломатериалов с СВЧ подводом тепловой энергии решение внутренней задачи основывается на дифференциальных уравнениях тепломассопереноса. Для описания изменения во времени полей влажности, температуры и давления в материале воспользуемся уравнениями, выраженными в следующей форме

$$c_m \rho_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda'_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial x} \right) \right) + q_{\text{свч}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_m}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 U_m}{\partial x^2} + a \cdot \delta \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{k_p}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial \tau} = \frac{RT_m}{\Pi_0 \mu} \left[k_p \frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} + \xi \cdot \rho_0 \frac{\partial U_m}{\partial \tau} \right] + \frac{p_m}{T_m} \left(\frac{\partial T_m}{\partial \tau} \right), \quad (3)$$

где c_m – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг · °C); ρ_m – плотность материала, кг/м³; τ – время; λ'_m – эффективный коэффициент теплопроводности; $q_{\text{свч}}$ – удельная мощность СВЧ излучения, Дж/(с · м³); T_m – температура материала; U_m – влагосодержание материала; p_m – давление, Па; ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, кг/м³; k_p – коэффициент фильтрационного массопереноса, с; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · °C); ξ – критерий парообразования; δ – относительный термоградиентный коэффициент, 1/°C; μ – молярная масса, кг/кмоль; Π_0 – пористость древесины, %.

Краевые условия для решения систем дифференциальных уравнений (1) – (3) можно представить в следующем виде:

– условия симметрии

$$\left. \frac{\partial U_m}{\partial \tau} \right|_{x=0} = 0; \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial T_m}{\partial \tau} \right|_{x=0} = 0; \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial p_m}{\partial \tau} \right|_{x=0} = 0; \quad (6)$$

– начальные условия, характеризующие начало процесса нагрева

$$T_m(0; x) = \text{const} \quad (7)$$

$$U_m(0; x) = \text{const} \quad (8)$$

$$p_m(0; x) = \text{const} \quad (9)$$

– начальные условия для каждой последующей стадии процесса будут представлять собой поля температур, влажности и давления по сечению материала после предыдущей стадии.

Граничные условия для решения систем дифференциальных уравнений (1) – (3) в общем случае могут быть представлены в следующем виде:

$$\alpha(T - T_{\text{пов.м.}}) = -\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} - \gamma \cdot j, \quad (10)$$

$$j = \beta(U_m - U_{\text{рам}}), \quad (11)$$

$$p_m(\tau; 0) = P_{\text{кам}}. \quad (12)$$

где $T_{\text{пов.м.}}$ – температура поверхности пиломатериала, °C; γ – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; j – поток массы, кг/(м² · с); β – коэффициент массоотдачи, м/с;

Поток массы определяется выражением:

$$j_{\text{м.пов}} = \rho_0 \cdot \left(a_m \cdot \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=0} + a_m \cdot \delta \cdot \left. \frac{\partial T_m}{\partial x} \right|_{x=0} \right). \quad (13)$$

Пористость древесины в уравнении (3) можно определить из выражения

$$\Pi_0 = 1 - \rho_{\delta} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\delta, \delta}} + \frac{W}{100 \cdot \rho_{\text{ж}}} \right). \quad (14)$$

В качестве источника теплоты в процессе нагрева и сушки материала используется СВЧ энергия. Удельная мощность, определяющая количество тепла, выделенного при СВЧ-нагреве в единице объема высушиваемого материала рассчитывается согласно классическому закону Джоуля-Ленца

$$q_{\text{СВЧ}} = 0,556 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \sigma \cdot f \cdot E^2, \quad (15)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость, Ф/м; $\operatorname{tg} \sigma$ – тангенс угла диэлектрических потерь; f – частота, Гц; E – напряженность электрического поля, В/м.

Напряженность электрического поля, которое создает точечный заряд в уравнении (15) определяется законом Кулона

$$E = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q_3}{r^2}, \quad (16)$$

при этом заряд

$$q_3 = C_0 \cdot U, \quad (17)$$

где q_3 – заряд, Кл; r – расстояние от заряда, создающего поле до точки в котором ищем поле.

Емкость конденсатора в этом случае может быть определена выражением

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h}, \quad (18)$$

где ε_0 – электрическая постоянная ($8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); S – площадь обкладки конденсатора, м²; h – размер образца в направлении действия диэлектрического поля, м.

Для описания доли подведенной мощности, которая поглощается древесиной и превращается в теплоту применяют тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{\sigma_f}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon}, \quad (19)$$

где σ_f – полная удельная активная проводимость на данной частоте, См/м; ω – угловая частота, рад/с.

Угловая частота и полная удельная активная проводимость на данной частоте в уравнении (19) определяются как

$$\omega = 2\pi f, \quad (20)$$

$$\sigma_f = \frac{1}{R}, \quad (21)$$

где R – сопротивление, Ом.

На рисунке 1 представлены графики определения диэлектрической проницаемости древесины с разным влагосодержанием и плотностью, а также для породы сосны в зависимости от температуры и влагосодержания.

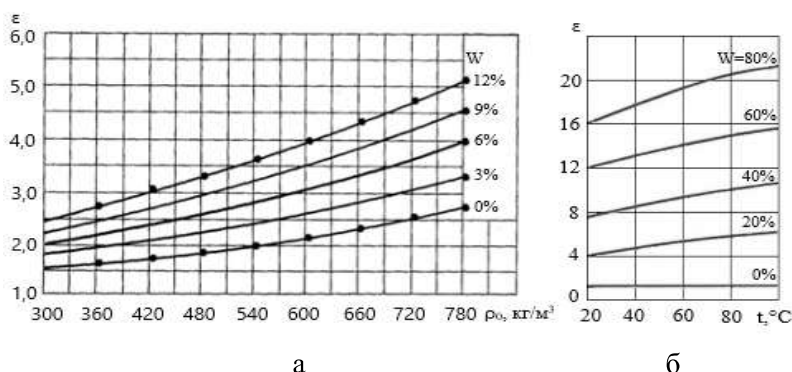


Рис.1. Зависимость диэлектрической проницаемости древесины: а – от плотности при разном влагосодержании; б – для сосны при различных температуре и влагосодержании

Изменение температуры среды в процессе СВЧ-нагрева материала определяется из теплового баланса

$$\rho_{\text{CM}} c_{\text{CM}} V_{\text{CB}} dT = \alpha (T_{\text{М.ПОВ}} - T) F_{\text{М}} d\tau + c_{\text{П}} F_{\text{М}} j_{\text{ПОВ}} T_{\text{ПОВ}} d\tau. \quad (22)$$

Откуда

$$\frac{dT}{d\tau} = \left[\frac{(\alpha F_M (T_{M.ПОВ} - T) + c_{П.М} j T_{ПОВ}) R}{\rho_{CM} c_{CM} V_{CB}} \right] T. \quad (23)$$

Следующей стадией осциллирующей СВЧ сушки пиломатериалов является вакуумирование. Теплоперенос для парогазовой фазы в условиях непрерывного понижения давления среды, а также при отсутствии полей скорости, температуры, плотности пара и инертного газа во внешней среде, определяется уравнениями материального и теплового балансов. Для нестационарных условий протекания процесса разность между притоком и отводом составит накопление массы и энергии в свободном объеме аппарата

$$V_{CB} d\rho_{П} = dm_{П} - dm_{C.П}, \quad (24)$$

$$V_{CB} d\rho_{Г} = -dm_{C.Г}, \quad (25)$$

$$\rho_{CM} c_{CM} V_{CB} dT = \alpha (T_{M.ПОВ} - T) F_M d\tau - Q_{C.ПГ} \rho_{CM} c_{CM} T d\tau + c_{П.М} j T_{ПОВ} d\tau. \quad (26)$$

где F – площадь поверхности материала, м²; V_{CB} – свободный объем камеры, м³; $Q_{C.ПГ}$ – производительность системы удаления пара, м³/с; $c_{П}, c_{CM}$ – теплоемкость пара и парогазовой среды, Дж/(кг · °С); $m_{П}, m_{CП}$ – масса пара и системы удаления пара, кг.

Левая часть уравнения (24) характеризует скорость изменения массы пара в парогазовой фазе в единице свободного объема аппарата; первое слагаемое правой части – скорость подвода массы пара в парогазовую фазу, а второе слагаемое – скорость его отвода в вакуумную линию. Соотношение (25) отличается от (26) отсутствием слагаемого, характеризующего подвод массы воздуха в единицу свободного объема вследствие герметичности аппарата.

В уравнении переноса энергии (26) левая часть представляет собой изменение теплосодержания парогазовой фазы; первый член правой части уравнения характеризует подвод или отвод тепла за счет теплообмена с поверхностью влажного материала; второй член – отвод тепла удаляемой в вакуумную линию парогазовой смесью; третий – приток тепла с парами влаги, удаляемыми из материала.

Отсюда, изменение давления и температуры среды описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dp_{Г}}{d\tau} = p_{Г} \left(\frac{1}{T} \frac{dT}{d\tau} - \frac{Q_{C.Г}}{V_{CB}} \right), \quad (27)$$

$$\frac{dp_{П}}{d\tau} = \frac{F \cdot R \cdot T}{V_{CB} \mu_{П}} j_{П} - p_{П} \left(\frac{Q_{C.П}}{V_{CB}} - \frac{1}{T} \frac{dT}{d\tau} \right), \quad (28)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \left[\frac{(\alpha F_M (T_{M.ПОВ} - T) + c_{П.М} j T_{ПОВ}) R}{(\mu_{П} p_{П} + \mu_{Г} p_{Г}) c_{CM} V_{CB}} - \frac{Q_{C.ПГ}}{V_{CB}} \right] T. \quad (29)$$

где $p_{П}, p_{Г}$ – давление пара и газа, Па; $\mu_{П}, \mu_{Г}$ – молярная масса пара и газа, кг/моль; $Q_{C.Г}$ – производительность системы удаления газа, м³/с.

В уравнении (26) фигурирует объемная производительность системы удаления пара и газа $Q_{C.ПГ}$, которая складывается из объемных производительностей системы удаления пара $Q_{C.П}$ и системы удаления газа $Q_{C.Г}$. Обычно при сушке понижением давления сушильная камера подключается к вакуумному насосу через конденсатор, который работает как своеобразный насос по пару. В этом случае объемная производительность системы удаления пара будет определяться объемными производительностями вакуумного насоса и конденсатора:

$$Q_{C.П} = Q_{ВН} + Q_{КОН}, \quad (30)$$

а объемная производительность системы удаления газа будет равна объемной производительности вакуумного насоса

$$Q_{C.T} = Q_{BH}. \quad (31)$$

Производительность вакуумного насоса можно определить, задавая время, в течение которого давление в камере необходимо понизить с $P_{атм}$ до рабочего остаточного $P_{ост}$

$$Q_{BH} = \frac{V_{CB}}{\tau_0} \cdot \ln \frac{P_{атм}}{P_{ост}}. \quad (32)$$

Объемная производительность конденсатора может быть определена из уравнения теплового баланса

$$Q_{кон} \rho_n [c_{n.пер} (T - T_{нас}) + c_n T_{нас} + r_n] = K_{кон} \Delta t_{кон} F_{кон}, \quad (33)$$

где левая часть уравнения учитывает тепловой эффект охлаждения пара до конденсации; правая часть характеризует количество теплоты, переданного в единицу времени пару от хладагента. Из уравнения (33) следует, что

$$Q_{кон} = \frac{K_{кон} \Delta t_{кон} F_{кон}}{\rho_n [c_{n.пер} (T - T_{нас}) + c_n T_{нас} + r_n]}. \quad (34)$$

Температура пара в состоянии насыщения может быть определена по уравнению Антуана

$$T_{нас} = \frac{B}{A - \ln p_{нас}}. \quad (35)$$

Относительная влажность среды в аппарате определяется уравнением

$$\varphi = \frac{P_n(T_p)}{P_n(T)}. \quad (36)$$

На стадии вакуумирования происходит отключение магнетронов, и сушка древесины осуществляется за счет аккумулированной материалом в процессе СВЧ нагрева энергии. В этом случае изменение во времени полей влажности, температуры и давления в материале описываются дифференциальными уравнениями (1) – (3) без учета внутреннего источника теплоты при граничных условиях (10) – (12).

После завершения стадии вакуумирования цикл «нагрев-вакуум» повторяется. Представленная система уравнений (1) – (3) с учетом краевых условий (4) – (12) и выражений, определяющих мощность СВЧ энергии и значения ее компонентов (14) – (20) позволяет полностью описать процессы, протекающие при нагреве пиломатериалов в СВЧ поле.

Для расчета процесса сушки были использованы следующие данные: порода – сосна с $\rho_0 = 400 \text{ кг/м}^3$; $f = 2450 \text{ МГц}$; $U = 220 \text{ В}$; $I = 4,5 \text{ А}$; $R = 48 \text{ Ом}$.

Для проверки адекватности разработанной модели процесса сушки пиломатериалов спроектирована лабораторная установка с импульсным режимом подвода СВЧ энергии в условиях пониженного давления (рис.2).

Установка работает следующим образом: высушиваемый материал 7, обладающий высокой естественной влажностью, взвешивают и для замера температуры в центр материала устанавливают термодатчик 8. После этого образец помещается в камеру сушки 1 на сетчатый держатель 5, который соединен с тензометрическим датчиком 6 для определения в постоянном режиме изменения текущей массы образца в установке. Далее камеру 1 герметизируют с помощью крышки. Стадия нагрева древесины протекает при атмосферном давлении среды, поэтому процесс начинается с включения с заданной по эксперименту мощностью модуля СВЧ нагрева, состоящего из СВЧ-генератора 2 с волноводами, вентилятора 3 и высоковольтного конденсатора 4. При достижении температуры в центре высушиваемого материала заданного значения происходит отключение СВЧ-генератора и стадия нагрева завершается. Затем с помощью блока управления 14 и вакуумного клапана 12 в работу задействуются

вакуумный насос 9 и конденсатор 11. Начинается стадия вакуумирования, при которой происходит постепенное понижение давления в аппарате с последующей выдержкой при постоянном давлении порядка 10 кПа. На данной стадии происходит быстрое охлаждение поверхности материала. Выдержка под вакуумом осуществляется до достижения заданного градиента температуры по сечению материала.

После завершения стадии вакуумирования цикл «нагрев-вакуум» повторяется. Таким образом процесс СВЧ-сушки древесины складывается из последовательно чередующихся стадий подачи СВЧ энергии (нагрева) и выдержки (вакуумирования) с целью снижения внутренних напряжений внутри образца. Количество циклов определяется толщиной пиломатериала и породой древесины. В ходе экспериментов в качестве образцов использовались сосновые пиломатериалы толщиной 50 мм с начальным влагосодержанием 80 и 30%.

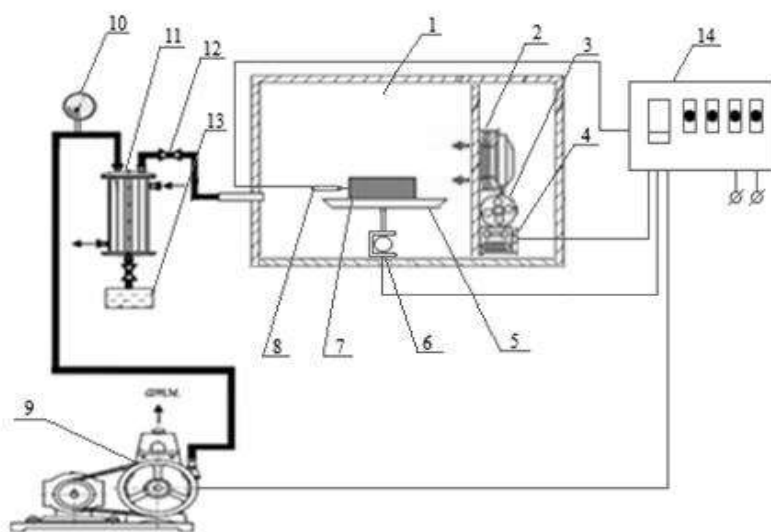


Рис. 2. Схема экспериментальной вакуумно-СВЧ установки сушки пиломатериалов: 1 – камера из нержавеющей стали; 2 – магнетрон; 3 – вентилятор; 4 – высоковольтный конденсатор; 5 – столик; 6 – тензометрический датчик; 7 – высушиваемый материал; 8 – термопара; 9 – вакуумный насос; 10 – вакуумметр; 11 – конденсатор; 12 – вакуумный клапан; 13 – конденсатосборник; 14 – блок управления

Результаты

В рамках изложенного выше математического описания процесса СВЧ сушки пиломатериалов были проведены экспериментальные исследования с целью проверки модели на адекватность. Результаты математического и физического моделирования представлены на рисунке 3 в виде кривых изменения давления, температуры, относительной влажности среды и влагосодержания образцов. Кривыми линиями изображены результаты математического моделирования, а точками – экспериментальные данные. Из рисунка видно, что один цикл процесса сушки состоит из двух стадий – нагрева и вакуумирования. Для того, чтобы минимизировать удаление влаги с поверхности материала и интенсифицировать процесс сушки, стадия нагрева древесины протекает при атмосферном давлении в камере.

Стадия нагрева, при влажности выше предела насыщения клеточных стенок, в первые два периода протекает с небольшими изменениями температуры центра и поверхности пиломатериала. В ходе моделирования и экспериментальных исследований было установлено, что диэлектрическая проницаемость материала оказывает существенное влияние на процесс нагрева. Так, с уменьшением влажности древесины наблюдается значительное уменьшение значения диэлектрической проницаемости, что, в свою очередь ведет к увеличению каждого последующего периода нагрева, что особенно заметно в зоне связанной влаги. Анализ кривых и статическая обработка показывает, что относительная погрешность расчетных данных не превышает 18% от данных, полученных экспериментальным путем.

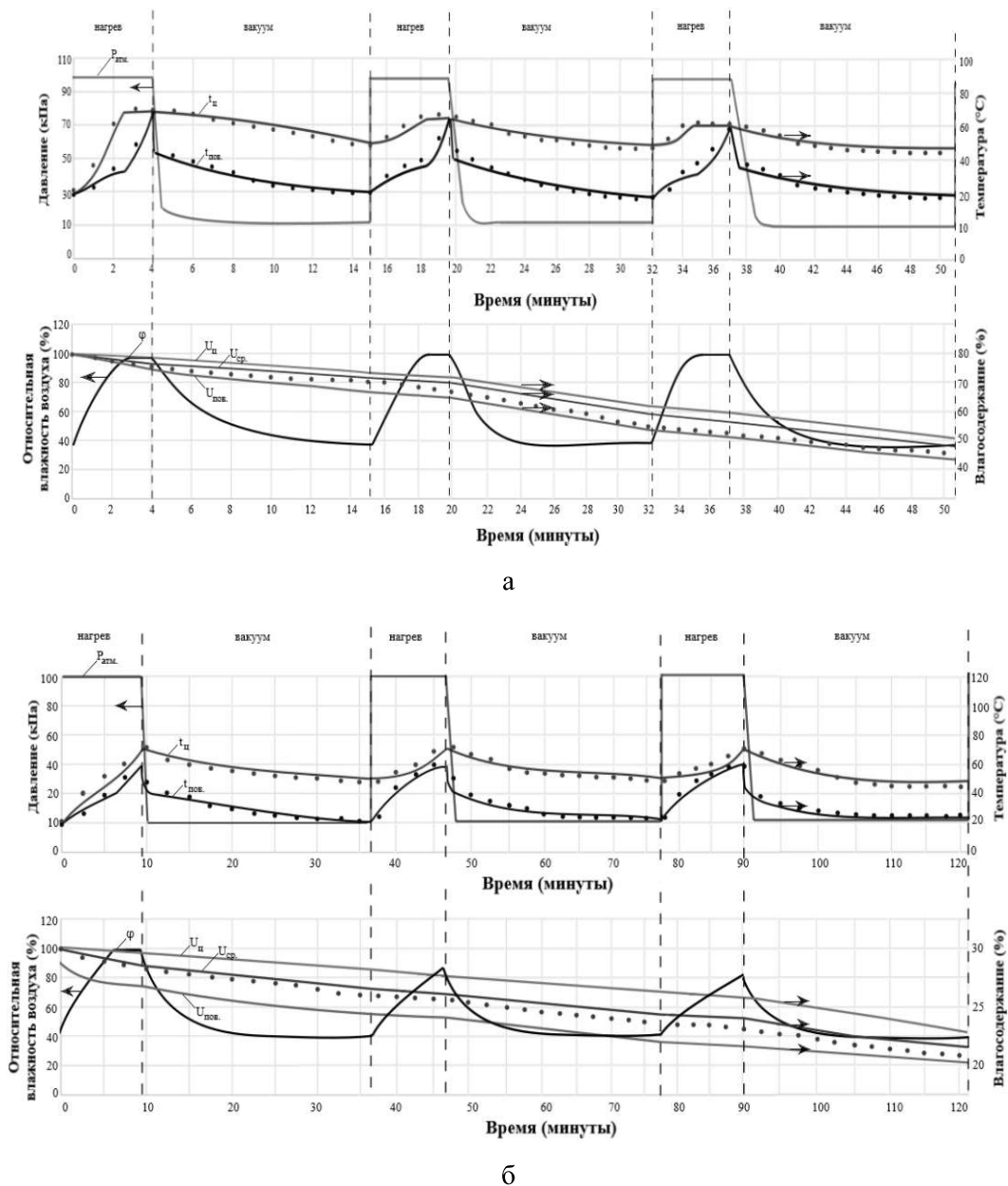


Рис. 3. Графики протекания процесса вакуумно-осциллирующей сушки сосновых пиломатериалов в СВЧ поле: а – при влагосодержании 80%; б – при влагосодержании 30%

Заключение

В ходе реализации разработанной математической модели была доказана удовлетворительная сходимость опытных и расчетных данных, что говорит об адекватности разработанной модели. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет 18%, что свидетельствует о возможности использования разработанной математической модели для выбора эффективных режимных параметров процесса сушки древесины. Представленная модель не ограничена конкретной породой древесины и может быть применена для пиломатериалов любых сортов. Было установлено, что полученные в результате моделирования электрофизические данные СВЧ-нагрева оказывают значительное воздействие на протекание процесса сушки. С уменьшением влажности и диэлектрической проницаемостью материала происходит увеличение времени каждой стадии цикла процесса сушки. Наиболее ярко данное изменение отражается при снижении влажности ниже предела гигроскопичности материала. Перспективным направлением дальнейших исследований является определение градиентов температуры, позволяющих сократить продолжительность процесса и оптимизировать режимы сушки, которые могут быть решены на основе разработанной математической модели.

Литература

1. Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р. Исследование процессов вакуумной сушки пиломатериалов при конвективных методах подвода тепла // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2012. №4. С. 20-24.
2. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Гильмиев Р.Р., Валиев Ф.Г. Снижение расхода энергии на проведение процессов сушки древесины посредством вакуумно-конвективной технологии // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2008. №5. С. 22-23.
3. Пат. № 2163328 Российская Федерация, МПК F26B3/04, F26B1/00. Способ конвективной сушки древесины / Сныцеров В.В. – опубл. 20.02.2001.
4. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Г., Кайнов П.А. Новые подходы к совершенствованию вакуумно-конвективных технологий сушки древесины // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2005. №5. С. 16.
5. Сафин Р.Р. Вакуумная сушка капиллярнопористых коллоидных материалов при конвективных способах подвода тепловой энергии: дисс.докт.техн. наук // Казань: Изд-во КГТУ. 2007. С.409.
6. Сафин Р.Р., Хакимзянов И.Ф., Кайнов П.А., Николаев А.Н., Сафина А.В. Обзор современных технологических решений повышения энергоэффективности в процессах сушки пиломатериалов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т.17. №21. С. 50-52.
7. Пат. №2425305 Российская Федерация, МПК F26B5/04, F26B3/34. Способ сушки и термической обработки древесины / Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Оладышкина Н.А., Хасаншин Р.Р., Кайнов П.А., Кузьмин И.А., Мазохин М.А., Шайхутдинова А.Р., Ахтямова Т.Н., Воронин А.Е.; патентообладатель ООО «НТЦ РПО» – 201010898/06; заявл. 04.03.2020; опубл. 27.07.2011.
8. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Хакимзянов И.Ф., Мухаметзянов Ш.Р., Кайнов П.А. Повышение энергоэффективности процесса осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки древесины путем использования теплового насоса // *Инженерно-физический журнал*. 2017. Т.90. №2. С. 334-341.
9. Tuntsev D.V., Safin R.R., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste// *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015*. 2015. pp. 7414929.
10. Safin R.R., Voronin A.E., Shaikhutdinova A.R., Nazipova F.V., Kaynov P.A. Method of rational use of waste of timber industries // *15th International Multidisciplinary GeoConference SGEM 2015*. Sofia, 2015. pp. 699-706.
11. Шагеева А.И., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Порфирьева К.М. Математическое моделирование процессов сушки пиломатериалов в СВЧ-среде // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2020. №57. С. 71-74.
12. Ковалева Л.А., Галимбеков А.Д. Влияние высокочастотного электромагнитного поля на физико-химические процессы в многокомпонентных средах // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2004. №1. С. 144-149.
13. Гареев Ф.Х. Нетрадиционная сушка древесины: вакуумная и СВЧ.//*Лесная промышленность*.2004.№5. С. 63.
14. Пат. № 2189549 Российская Федерация, МПК F26B3/347. Установка для сушки древесины / Бомбин А.М., Скуратович Н.В., Недорезова Е.В. – опубл. 20.09.2002
15. Кайнов П.А., Мухаметзянов Ш.Р., Шамсутдинова А.И., Мухтарова А.Р. Математическая модель процесса сушки пиломатериала в вакуумной СВЧ установке // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2017. №4. С. 17-21.
16. Шамсутдинова А.И., Сафин Р.Р., Илалова Г.Ф., Мухтарова А.Р. Вакуумная СВЧ сушка древесины: формулирование математической модели // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2017. № 50. С. 53-56.
17. Datta A.K., Ni H. Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture // *Journal of Food Engineering*. 2002. Vol: 51. pp. 355-364. DOI: 10.1016/S0260-8774(01)00079-6.
18. Guanben D., Siqun W., Zhiyong C. Microwave drying of wood strands // *Drying Technology*. 2005. Vol: 23. pp. 2421–2436. DOI: 10.1080/07373930500340494.
19. Mollekopf N., Treppe K., Dixit O., Bauch J., Fuhrlich T. Simultaneous Drying and Modification of Properties of Starch Using Vacuum Microwave Treatment // *Drying Technology*. 2011. Vol: 29, iss. 5. pp. 599-605. DOI: 10.1080/07373937.2010.519839.

20. Seyfarth R., Leiker M., Mollekopf N. Continuous drying of lumber in a microwave vacuum kiln // In 8th International IUFRO Wood Drying Conference. 2003. Vol. 8. pp. 159-163.

©**Шагеева А.И.** – аспирант кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: sham.adilya@yandex.ru; **Кайнов П.А.** – канд.техн.наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: petr.k@plastline.org; **Сафин Р.Р.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: cfaby@mail.ru; **Хасаншин Р.Р.** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: rusl2881@mail.ru.

UDC 674.047.3

MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES OF MICROWAVE DRYING OF SAW-TIMBERS IN THE OSCILLATING MODE

A.I. Shageeva, P.A. Kainov, R.R. Safin, R.R. Khasanshin

This work is devoted to the development of a mathematical model of the process of microwave drying of lumber in an oscillating mode. The article presents the formalization of the heat and mass transfer model under the conditions of the internal and external tasks of the process and the approbation of the mathematical model for adequacy. The calculated and experimental dependences of the change in the temperature of the center and surface of the material, as well as the moisture content of wood on the pressure in the apparatus and the relative humidity of the environment, with an initial moisture content above and below the saturation limit of cell walls, are presented. Based on the results of physical modeling, the optimal scheme for microwave drying of lumber was determined, it was found that the process of microwave heating of lumber in the mode of medium pressure oscillations can proceed at atmospheric pressure of the medium or with preliminary removal of gas from the apparatus.

Keywords: drying, microwave heating, oscillating mode, wood.

References

1. Safin R.R., Mukhametzyanov Sh.R. [Investigation of the processes of vacuum drying of lumber with convective methods of heat supply] // Derevoobrabatывayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2012. No. 4. pp. 20-24. (In Russ.)
2. Safin R.R., Khasanshin R.R., Gilmiev R.R., Valiev F.G. [Reducing energy consumption for wood drying processes by means of vacuum convective technology] // Derevoobrabatывayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2008. No. 5. pp. 22-23. (In Russ.)
3. Pat. No. 2163328 Russian Federation, IPC F26B3/04, F26B1/00. The method of convective drying of wood / Snytserev V.V. - publ. 02.20.2001. (In Russ.)
4. Safin R.R., Khasanshin R.R., Safin R.G., Kainov P.A. New approaches to improving vacuum-convective technologies for wood drying // Woodworking industry. 2005. No. 5. pp. 16. (In Russ.)
5. Safin R.R. Vacuum drying of capillary-porous colloidal materials with convective methods of supplying thermal energy: diss.dokt.techn. sciences // Kazan: Publishing House of KSTU. 2007. p.409. (In Russ.)
6. Safin R.R., Khakimzyanov I.F., Kainov P.A., Nikolaev A.N., Safina A.V. [Review of modern technological solutions to improve energy efficiency in the processes of drying lumber] // Vestnik Kazanskogo technologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2014. Vol.17. No. 21. pp. 50-52. (In Russ.)
7. Pat. No. 2425305 Russian Federation, IPC F26B5/04, F26B3/34. Way of drying and heat treatment of wood / Safin R.R., Safin R.G., Oladyshkina N.A., Khasanshin R.R., Kainov P.A., Kuzmin I.A., Mazokhin M.A., Shaikhutdinova A.R., Akhtyamova T.N., Voronin A.E.; patent holder LLC "NTC RPO" - 201010898/06; dec. 03/04/2020; publ. 07/27/2011. (In Russ.)
8. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A. [Improving the energy efficiency of the process of oscillating vacuum-conductive drying of wood by using a heat pump] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. 2017. V.90. No. 2. pp. 334-341. (In Russ.)

9. Tuntsev D.V., Safin R.R., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. pp. 7414929.
10. Safin R.R., Voronin A.E., Shaikhutdinova A.R., Nazipova F.V., Kaynov P.A. Method of rational use of waste of timber industries // 15th International Multidisciplinary GeoConference SGEM 2015. Sofia, 2015. pp. 699-706.
11. Shageeva A.I., Safin R.R., Mukhametzyanov Sh.R., Porfiryeva K.M. [Mathematical modeling of lumber drying processes in the microwave environment] // Actual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forestry complex]. 2020. No. 57. pp. 71-74. (In Russ.)
12. Kovaleva L.A., Galimbekov A.D. [Influence of a high-frequency electromagnetic field on physical and chemical processes in multicomponent media] // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University]. 2004. No. 1. pp. 144-149. (In Russ.)
13. Gareev F.Kh. [Unconventional drying of wood: vacuum and microwave] // Lesnoy vestnik [Forest industry]. 2004. №5. p. 63. (In Russ.)
14. Pat. No. 2189549 Russian Federation, IPC F26B3/347. Installation for wood drying / Bombin A.M., Skuratovich N.V., Nedorezova E.V. - publ. 20.09.2002. (In Russ.)
15. Kainov P.A., Mukhametzyanov Sh.R., Shamsutdinova A.I., Mukhtarova A.R. [Mathematical model of the lumber drying process in a vacuum microwave unit] // Derevoobrabatyvayushaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2017. No. 4. pp. 17-21. (In Russ.)
16. Shamsutdinova A.I., Safin R.R., Ilalova G.F., Mukhtarova A.R. [Vacuum microwave drying of wood: formulation of a mathematical model] // Actual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex]. 2017. No. 50. pp. 53-56. (In Russ.)
17. Datta A.K., Ni H. Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture // Journal of Food Engineering. 2002. Vol: 51. pp. 355-364. DOI: 10.1016/S0260-8774(01)00079-6.
18. Guanben D., Siqun W., Zhiyong C. Microwave drying of wood strands // Drying Technology. 2005. Vol: 23. pp. 2421-2436. DOI: 10.1080/07373930500340494.
19. Mollekopf N., Treppe K., Dixit O., Bauch J., Fuhrlich T. Simultaneous Drying and Modification of Properties of Starch Using Vacuum Microwave Treatment // Drying Technology. 2011. Vol: 29, iss. 5. pp. 599-605. DOI: 10.1080/07373937.2010.519839.
20. Seyfarth R., Leiker M., Mollekopf N. Continuous drying of lumber in a microwave vacuum kiln // In 8th International IUFRO Wood Drying Conference. 2003. Vol: 8. pp. 159-163.

©Shageeva A.I. – Post-graduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: sham.adilya@yandex.ru; Kainov P.A. – PhD of technical sciences, associate professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU e-mail: petr.k@plastline.org; Safin R.R. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: cfaby@mail.ru; Khasanshin R.R. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: rusl2881@mail.ru.

УДК 66.061.16

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛОДОНОСЯЩИХ ВЕТОК ОБЛЕПИХИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Л.Ю. Исмаилов, А.В. Сафина

Предложен способ переработки плодоносящих веток облепихи, позволяющий осуществить сборку урожая и переработку неплодовой части путем экстракции ценных компонентов. Разработана схема установки для переработки облепихи с использованием теплового насоса, позволяющего перераспределить тепловую энергию потоков. Проведенные тепловые расчеты доказали целесообразность предлагаемых решений, поскольку обеспечивается равенство количества тепловой энергии, образуемой в процессе замораживания плодоносящих веток, и количества тепловой энергии для пропаривания неплодовой части и проведения процесса экстракции.

Ключевые слова: облепиха, ягоды, неплодовая часть, замораживание, тепловой насос, экстракция.