УДК 631.172

DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-82-89

Р.С. Аипов, М.И. Тухватуллин, Р.Б. Яруллин, В.Ю. Кабашов

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ
ПРИ ДИСКРЕТНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ИСТОЧНИКОВ СВЧ-ЭНЕРГИИ**

Ключевые слова: математическая модель; древесина; температура; влажность; электромагнитное поле сверхвысокой частоты.

Введение. Сушка является длительной и вследствие этого дорогой операцией в технологическом процессе деревообрабатывающего производства [4]. В существующих установках СВЧ-сушки пиломатериалов используются дорогостоящие источники СВЧ-энергии (915 и 416 МГц), которые отличаются высокими технической сложностью и стоимостью в обслуживании и эксплуатации (затраты электрической энергии на сушку 1 м³ древесины равны 700...900 кВт·час) [13]. В процессе СВЧ-сушки такими установками сложно получить равномерное распределение тепла, так как расположенные ближе к источнику СВЧ-энергии штабеля перегреваются, а пиломатериал, расположенный в глубине штабеля, не высыхает до необходимой степени влагосодержания [6]. Для устранения вышеприведенных недостатков разработана технологическая установка [1], в которой равномерное распространение температуры в пространстве рабочей камеры обеспечивается за счет облучения древесины встречно направленными потоками электромагнитной энергии от источников, размещенных на боковых поверхностях камеры в шахматном порядке на расстоянии 27,5 см друг от друга, мощностью 1,2 кВт каждый и вращения пиломатериалов с частотой 5...6 об./мин [2].

Цель исследования – создание математической модели технологической установки.

Результаты исследования. Глубокая сушка обеспечивается, если внутренний перенос влаги к поверхностным зонам древесины осуществляется при малых градиентах воды [3]. Для этого следует при сверхвысокочастотном нагреве пиломатериала обеспечить внутренний источник энергии, изменив направление материального переноса. Тогда возможно контролировать температуру внутренних зон, управляя процессом испарения воды и градиентом влаги по толщине древесины. Уравнение переноса влаги q , кДж в пиломатериале, в этом случае, будет иметь следующий вид [7]:

$$q = -\alpha \rho_0 \left(\frac{dU}{dt} - \alpha \delta^T \left(\frac{dT}{dt} \right) \right) - \alpha_p \left(\frac{dp}{dt} \right), \quad (1)$$

где α – коэффициент потенциалопроводности молекулярного и капиллярного переноса воды; α_p – коэффициент конвективной диффузии [14]; δ^T – термоградиентный коэффициент; ρ_0 – плотность абсолютно сухой древесины, кг/м³ [11]; $\frac{dU}{dt}$ – изменение влажности по времени, %; $\frac{dT}{dt}$ – изменение температуры по времени, °C; $\frac{dp}{dt}$ – изменение плотности по времени, кг/м³.

Напряженность внутреннего переноса влажности при СВЧ-нагреве древесины ограничивается обменом с внешней средой. Если при достаточно большой мощности источников электромагнитной энергии, передаваемой древесине, не

увеличивать влагоотдачу, влажность поверхностных слоёв пиломатериала становится больше влажности внутренних [5]. Закономерности тепло- и массопереноса влаги в древесине при воздействии СВЧ-излучения с дискретным расположением источников могут быть описаны системой дифференциальных уравнений в частных производных [15]:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \alpha \nabla^2 T + \frac{\varepsilon^p r_0}{c_s} \frac{dU}{dt} + \frac{Q_v}{c_s \rho_0}; \\ \frac{dU}{dt} &= \alpha_m \nabla^2 u + \alpha_m \delta^T \nabla^2 T + \varepsilon^p \frac{dU}{dt}; \\ \frac{d\rho}{dt} &= \alpha_p \nabla^2 \rho + \frac{\varepsilon^p}{c_s} \frac{dU}{dt}, \end{aligned} \quad (2)$$

где T – температура древесины, °C; u – влажность древесины, %; ρ – плотность древесины, кг/м³; α – коэффициент температуропроводности; ε^p – критерий фазового перехода; r_0 – скрытая теплота парообразования, кДж/кг [12]; c_s – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·K) [12]; Q_v – количество тепла, выделяемого в теле, кДж/кг.

Для практических целей необходимо разработать математическую модель процесса сушки всего объема пиломатериалов, одновременно загружаемого в камеру. При этом наибольший интерес представляют закономерности изменения температуры и влажности от времени. Режимы работы сушильной установки определяются двумя основными параметрами: частотой вращения штабеля пиломатериалов и количеством включенных источников СВЧ-энергии.

Изменение влажности в процессе СВЧ-сушки зависит от параметров:

$$\dot{U} = f \{ U_0, T_0, m_0, E, \omega, t \}, \quad (3)$$

где U_0 – начальные значения влажности, %; T_0 – начальные значения температуры, °C; m_0 – начальные значения массы пиломатериала, кг; E – мощность СВЧ-излучения, кВт; ω – частота вращения штабеля пиломатериалов, об./мин.

При этом, согласно (2), изменение влажности происходит под действием температурного поля, величина которого зависит от мощности СВЧ-излучения, и частоты вращения штабеля пиломатериалов [8]. В общем виде зависимость изменения температуры и влажности пиломатериалов с начальными условиями U_0, T_0, m_0 при сушке в СВЧ-установке можно записать

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= f \{ E(t), \omega \}; \\ \frac{dU}{dt} &= f \{ E(t), \omega \}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $E(t)$ – затраты электрической энергии на СВЧ сушку, кВт·час.

Рассмотрим зависимости изменения влажности и температуры штабеля пиломатериалов: включены все семь СВЧ-генераторов и привод

вращения штабеля пиломатериалов. В пространство камеры загружается штабель пиломатериалов – 10 досок с геометрическими размерами: длина доски – 2000 мм, ширина – 150 мм, толщина 50 мм. Частоту вращения штабеля пиломатериалов примем равной $\omega = 5$ об./мин, так как ранее проведенными экспериментами доказано, что она обеспечивает равномерное распределение тепла в пространстве камеры с дискретным расположением источников СВЧ-энергии.

Для проведения экспериментов было применено следующее поверенное оборудование: прибор для измерения влажности материалов testo 606-1 с погрешностью не более 0,2 %, поверхностный термометр testo 905-T2, инфракрасный пирометр testo 830-T1. Измерения влажности и температуры проводились на поверхности штабеля пиломатериалов: на глубине 1/2 толщины заготовки и на глубине 1/4 толщины заготовки с шагом 100 мм по длине материала штабеля. На

рисунке 1 представлен образец заготовки для проведения измерения температуры, материал – сосна. Начальную влажность заготовок определяли по весу на измерительных весах с погрешностью измерения не более 5 г. На рисунке 2 приведены графики изменения влажности, а на рисунке 3 – соответствующие графики изменения температур (по результатам измерений 10 образцов пиломатериалов, заложенных штабелем в камеру). Для аналитического описания полученных графических зависимостей представим их в виде полиномов от мощности СВЧ-излучения за единицу времени:

$$\begin{aligned}\frac{dT}{dt} &= \sum_{i=0}^n a_i E(t)^i; \\ \frac{dU}{dt} &= \sum_{j=0}^m b_j E(t)^j.\end{aligned}\quad (5)$$

где n, m – степени полиномов, a, b – коэффициенты при этих степенях.

Рисунок 1

Образец заготовки для измерения влажности и температуры:

1 – на поверхности; 2 – на глубине 1/2 толщины заготовки; 3 – на глубине 1/4 толщины заготовки

Используя пакет MatLab, можно рассчитать коэффициенты a, b , задавая в качестве исходных данных экспериментально полученные значения температуры и влажности, и задавая величины n, m . На рисунке 4 приведены усредненные

значения температуры (верхний график), влажности (средний график) от времени сушки и влажности от температуры (нижний график).

Полученные аналитические выражения имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{dT}{dt} &= -0,0001E(t)^8 + 0,0039E(t)^7 - 0,0784E(t)^6 + 0,8141E(t)^5 + \\ &- 4,5549E(t)^4 + 12,6891E(t)^3 - 10,5178E(t)^2 - 20,7449E(t) + 36,1344; \\ \frac{dU}{dt} &= 0,0004E(t)^5 - 0,0025E(t)^4 - 0,0094E(t)^3 + 0,0185E(t)^2 + \\ &- 0,0174E(t) + 0,0174.\end{aligned}\quad (6)$$

При этом на нижнем графике рисунка 4, показывающего убывание влажности при изменении температуры, видно, что даже аппроксимация полиномами 8-го и 5-го порядков не дает достаточной точности.

Для получения более адекватной математической модели разобьем весь процесс СВЧ-сушки пиломатериалов на 4 участка, в пределах каждого из которых проведем аппроксимацию аналогичным образом, но полиномами меньших порядков.

Рисунок 2

Изменение влажности 10 образцов пиломатериалов, заложенных штабелем в камере с дискретно расположенными источниками СВЧ-энергии, по результатам экспериментальных исследований

Рисунок 3

Изменение температуры 10 образцов пиломатериалов, заложенных штабелем в камере с дискретно расположенными источниками СВЧ-энергии, по результатам экспериментальных исследований

Рисунок 4

Результаты моделирования процесса сушки штабеля пиломатериалов: $T(t)$ – зависимость температуры от времени; $W(t)$ – зависимость влажности от времени; $W(T)$ – зависимость влажности от температуры

В этом случае математическая модель процесса сушки примет вид:

$$\frac{dT}{dt} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_1} a_{i1}^1 E^1(t)^{i1} & \text{при } U_0 \leq U < U_1; \\ \sum_{i=2}^{n_2} a_{i2}^2 E^2(t)^{i2} & \text{при } U_1 \leq U < U_2; \\ \sum_{i=3}^{n_3} a_{i3}^3 E^3(t)^{i3} & \text{при } U_2 \leq U < U_3; \\ \sum_{i=4}^{n_4} a_{i4}^4 E^4(t)^{i4} & \text{при } U_3 \leq U < U_4; \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{dU}{dt} = \begin{cases} \sum_{j=1}^{m_1} a_{j1}^1 E^1(t)^{j1} & \text{при } U_0 \leq U < U_1; \\ \sum_{j=2}^{m_2} a_{j2}^2 E^2(t)^{j2} & \text{при } U_1 \leq U < U_2; \\ \sum_{j=3}^{m_3} a_{j3}^3 E^3(t)^{j3} & \text{при } U_2 \leq U < U_3; \\ \sum_{j=4}^{m_4} a_{j4}^4 E^4(t)^{j4} & \text{при } U_3 \leq U < U_4, \end{cases}$$

где величины $U_1 \dots U_4$ выбираются из соображений наиболее простой формы каждого из получаемых участков. Аналитические выражения для каждого из четырех участков имеют вид аппроксимации полиномов 3 и 4 порядка. Проведено моделирование процесса сушки от начальных условий: $U_0 = 84\%$, $T_0 = 24^\circ\text{C}$, до момента,

когда влажность древесины понизится до 7% [9, 10].

На рисунке 5 круглыми маркерами показаны усредненные данные, использованные для построения математических моделей. Сплошная синяя линия соответствует модели (6), а черная – модели (7).

Таким образом, по рисунку 5 видно, что модель (6), несмотря на высокий порядок полинома, не дает адекватного описания процесса, в то время как математическая модель (7), имея меньший порядок полинома, хорошо соответствует экспериментальным данным. При этом степени полиномов выражений (7) не превышают 4. При аппроксимации изменений влажности и температуры штабеля пиломатериалов, полученных экспериментальным путем и приведенных в результате математического моделирования к одному виду, выявлены зависимости, приведенные на рисунке 6. Как видно из рисунков, адекватность математической модели подтверждается экспериментальными исследованиями. Относительная погрешность математического моделирования и экспериментальных исследований не превышает 3% . Время сушки пиломатериалов с исходными параметрами равно 15 часам, у аналогичных СВЧ-установок время сушки составляет 18...20 часов.

Рисунок 5
Результаты моделирования – сравнение математических моделей процесса сушки штабеля пиломатериалов

Рисунок 6

Аппроксимация изменений влажности и температуры штабеля пиломатериалов:

а – изменение влажности; б – изменение температуры; 1 – зависимости, полученные в результате математического моделирования; 2 – зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований

Выводы. В СВЧ-камере обеспечивается равномерное распределение тепла, в результате чего уменьшается время обработки пиломатериалов электромагнитной энергией сверхвысокой частоты.

Дискретное и равномерное расположение источников СВЧ-энергии установки при вращении пиломатериалов позволяет за счет равно-

мерности распределения тепла в теле пиломатериала сократить время сушки на 25 %.

Разработана математическая модель, позволяющая проводить моделирование процесса сушки различных пород древесины в СВЧ-установке с дискретным расположением источников СВЧ-энергии и вращением пиломатериала относительно них.

Библиографический список

1. Аипов, Р.С. СВЧ-установка для сушки пиломатериалов [Текст] / Р.С. Аипов, М.И. Тухватуллин // Сельский механизатор. 2011. № 8. С. 8–9.
2. Аипов, Р.С. Повышение эффективности сушки вращающихся пиломатериалов дискретным расположением магнетронов СВЧ-установки [Текст] / Р.С. Аипов, М.И. Тухватуллин // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы III Международной научно-практической конференции. Саратов, 2012. С. 7–9.
3. Анненков, Ю.М. Основы электротехнологий [Текст]: учебное пособие / Ю.М. Анненков. Томск: ТПУ, 2005. 208 с.
4. Болдырев, П.Б. Сушка древесины [Текст]: практическое руководство / П.Б. Болдырев. СПб.: Проффикс, 2002. 156 с.
5. Галкин, В.П. Основные физические закономерности процессов распространения электро-

магнитных волн в древесине [Текст] / В.П. Галкин // Лесной вестник. 2010. № 2. С. 212–214.

6. Гареев, Ф.Х. СВЧ плюс вакуум: от сложного к простому [Текст] / Ф.Х. Гареев // Лесная промышленность. М.: Леспрот, 2010. С. 102–104.

7. Гороховский, А.Г. Модели влагопереноса в коллоидной капиллярно-пористой структуре древесины [Текст] / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Тр. III международ. евразийского симп. Екатеринбург: УГЛТУ, Уралтехнопарк, 2008. С. 41–46.

8. Гороховский, А.Г. Анализ процессов сушки древесины существенно неизотермическими режимами [Текст] / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Старова, А.А. Миков // Лесной журнал. 2018. № 2. С. 88–96.

9. Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности [Текст]: ГОСТ

16588-91. Введ. 1991-28-12. М.: Межгосударственный стандарт, 2009. 5 с.

10. Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия [Текст]: ГОСТ 19773-84. Введ. 1984-29-06. М.: Межгосударственный стандарт, 2009. 20 с.

11. Диденко, А.Н. СВЧ-энергетика. Теория и практика [Текст]: учебное пособие / А.Н. Диденко. М.: Наука, 2003. 446 с.

12. Лыков, А.В. Теория сушки [Текст]: учебное пособие / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 471 с.

13. Платонов, А.Д. Оценка использования СВЧ-установок малой мощности для сушки

оцилиндрованных бревен [Текст] / А.Д. Платонов // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 70 (06). С. 1–11.

14. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины [Текст]: учебное пособие / П.С. Серговский, А.И. Расев. М.: Лесн. пром., 1987. 360 с.

15. Тухватуллин, М.И. Результаты моделирования процесса СВЧ-сушки пиломатериалов [Текст] / М.И. Тухватуллин // Исследования в области естествознания, техники и технологий как фактор научно-технического прогресса. Материалы международной научно-практической конференции. Белгород, 2018. С. 137–141.

Сведения об авторах

1. **Аипов Рустам Сагитович**, доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин и электрооборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ.

2. **Тухватуллин Мидхат Ильфатович**, старший преподаватель кафедры электроснабжения и применения электрической энергии в сельском хозяйстве, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ.

3. **Яруллин Ринат Бариевич**, доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин и электрооборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ.

4. **Кабашов Владимир Юрьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и технологического оборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ.

В статье приведены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований процесса сушки пиломатериалов в электромагнитном поле сверхвысокой частоты на технологической установке. Математическое моделирование реализовано в системе MatLab. Экспериментальные исследования проведены на технологической установке с дискретным расположением источников СВЧ-энергии и приводом вращения штабеля пиломатериалов. Приведены закономерности тепло- и массопереноса влаги в древесине при воздействии СВЧ-излучения, определены граничные и начальные условия. Время сушки пиломатериалов с исходными параметрами: влажность – 82...85 %, температура – 23...27 °С – в установке с дискретным расположением источников СВЧ-энергии и при-

водом вращения штабеля пиломатериалов составило 15 часов; у аналогичных СВЧ-установок время сушки равно 18...20 часам. Конечная влажность пиломатериалов находится в пределах 5...7 %. В результате сравнения экспериментальных и математических зависимостей относительная погрешность не превышает 3 %. Дискретное и равномерное расположение источников СВЧ-энергии установки при вращении пиломатериалов позволяет за счет равномерности распределения тепла в теле пиломатериала сократить время сушки на 25 %. Разработанная математическая модель позволит проводить моделирование процесса сушки различных пород древесины в СВЧ-установке с дискретным расположением источников СВЧ-энергии и вращением пиломатериала относительно них.

R. Aipov, M. Tukhvatullin, R. Yarullin, V. Kabashov

MATHEMATICAL MODEL OF THE TIMBER DRYING PROCESS WITH DISCRETE LOCATION OF SUPER HIGH FREQUENCY ENERGY SOURCES

Key words: *mathematical model; timber; temperature; humidity; ultra high frequency electromagnetic field.*

Authors' personal details

1. **Aipov Rustam**, Doctor of technical sciences, professor of the Electric Machinery and Installation department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letia Octiabria St., 34.

2. **Tukhvatullin Midhat**, senior lecturer at the Department of Power Supply and Use of Electric Energy in Agricultural Production, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letia Oktiabria St., 34.

3. **Yarullin Rinat**, Doctor of technical sciences, professor of Electrical Machinery and Installation department. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letia Oktiabria St., 34.

4. **Kabashov Vladimir**, Doctor of technical sciences, professor of the department of Life Safety and Technological Equipment, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letia Oktiabria St., 34.

The paper presents the results of mathematical modeling and experimental studies of the timber drying process in the ultra-high frequency electromagnetic field at a technological installation. Mathematical modeling is implemented in the MatLab system. Experimental studies were carried out on a technological installation with a discrete arrangement of microwave energy sources and a rotation drive of a timber pile. The regularities of moisture heat and mass transfer in the wood under the influence of microwave radiation are given. The boundary and initial conditions are determined. The drying time for timber has the following initial parameters: 15 hours at humidity – 82...85 %, temperature – 23...27 °C in the installation with a discrete ar-

range of microwave energy sources and a timber rotation drive; 18...20 hours for similar microwave installations. The final timber moisture is within 5...7 %. As a result of comparing experimental and mathematical dependencies, the relative error does not exceed 3 %. The discrete and uniform arrangement of microwave energy sources of the installation during the timber rotation provides reduction of the drying time at 25 % due to the uniform distribution of heat in the timber body. The developed mathematical model will enable to model the drying process for different wood species in the microwave installation with discrete location of microwave energy sources and timber rotation.

© Аипов Р.С., Тухватуллин М.И., Яруллин Р.Б., Кабашов В.Ю.