

УДК 674.047:66.047.354

## РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СВЧ-СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

© *В.И. Мелехов, д-р техн. наук, проф.*

*В.А. Шульгин, ст. преп.*

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,  
наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: v.shulgin@agtu.ru

В настоящее время интенсивно развивается сушка древесины в микроволновых лесосушильных камерах. При проведении процесса сушки с применением энергии электромагнитного поля наиболее эффективным является диапазон сверхвысоких частот. Результаты исследования фундаментальных свойств древесины, процессов, происходящих в древесине при воздействии электромагнитного поля различной частоты, а также модели поглощения микроволновой энергии единичными сортами и штабелем пиломатериалов, приведены в различных научных источниках, где рассмотрены теплофизические вопросы сушки древесины, но недостаточно освещен процесс контроля сушки и электрофизические явления, происходящие при этом. Это не позволяет осуществлять оптимальный контроль и автоматическое управление процессом сушки древесины, что может привести к таким негативным проявлениям, как повышение температуры и электрической пробой в пиломатериале и объеме резонатора, деформации и короблению высушиваемого пиломатериала. В отличие от сушки древесины в конвективных установках процесс в камерах резонаторного типа с использованием сверхвысоких частот имеет свои особенности, характеризующиеся резонансными электрофизическими явлениями, происходящими в резонаторе, которые могут быть рассмотрены на основе базовых положений электродинамики. Цель данной работы – на основании энергетической функциональной зависимости резонатора (добротности) получить возможность осуществлять измерение и контроль процесса сушки древесины. Рассмотрены электрофизические явления, свойственные резонатору лесосушильной камеры в процессе сушки древесины при сверхвысоких частотах, приведены аналитические выражения баланса мощностей электромагнитного вектора Пойтинга, коэффициенты, позволяющие устанавливать оптимальный режим сушки.

*Ключевые слова:* СВЧ-сушка древесины, резонатор, добротность резонансной камеры, тангенс угла диэлектрических потерь, энергия электромагнитного поля, удельные диэлектрические потери, подведенная мощность.

В теории и практике СВЧ-энергетики четко выявляются ее основные преимущества, к числу которых относится возможность сосредоточения большой электромагнитной энергии в малых объемах и возможность ее концентрации в определенном месте, что может явиться основой разработки новых энергосберегающих технологий. Микроволновое нагревание применяется не только в лесосушильных камерах, но и в других процессах [3], а также в бытовых и специализированных промышленных установках [2, 4–6]. Результаты исследования фундаментальных свойств древесины, процессов, происходящих в древесине при воздействии электромагнитного поля различной частоты, а также мо-

дели поглощения микроволновой энергии единичными сортами и сушильным штабелем пиломатериалов, приведены в монографии В.П. Галкина [1]. В этой работе рассмотрены основные теплофизические вопросы сушки древесины, но недостаточно освещен процесс контроля сушки и электрофизические явления, происходящие в СВЧ-сушильной камере. Это не позволяет осуществлять оптимальный контроль и автоматическое управление процессом сушки древесины, что может привести к таким нежелательным явлениям, как увеличение температуры и электрической пробой в пиломатериале и объеме резонатора, деформации и короблению высушиваемого пиломатериала.

В отличие от сушки древесины в конвективных установках протекание процесса в СВЧ-сушильных камерах резонаторного типа имеет свои особенности [7–9], характеризующиеся резонансными электрофизическими явлениями, происходящими в резонаторе, которые могут быть рассмотрены на основе базовых положений электродинамики.

Одной из основных особенностей сушки древесины в СВЧ-сушильной камере является невозможность измерения для системы с распределенными параметрами традиционных для системы с сосредоточенными электрическими параметрами напряжения  $U$  и тока  $I$ , которые в разных пространственных точках имеют различное значение. Поэтому в СВЧ-диапазоне измеряют напряженность электромагнитного поля  $E$ . Соотношение  $J_{эп} = \gamma_{э} E$ , связывающее вектор плотности электрической проводимости  $J_{эп}$  с вектором напряженности электрического поля  $E$  через удельную электрическую проводимость, называют законом Ома в дифференциальной форме. На практике производить измерения напряженности электромагнитного поля в СВЧ-резонаторе затруднительно, поскольку ее значения имеют распределенную в пространстве структуру и составляют порядка сотен, тысяч и более киловатт на метр.

Поскольку определяющим для физического процесса нагревания в СВЧ-диапазоне является то, что в системе с распределенными постоянными теряет всякий смысл значение величины тока и напряжения: в разных точках пространственной структуры они имеют различное значение. Поэтому измерение мощности это единственный способ однозначной оценки интенсивности электромагнитного поля, от которой зависит скорость нагревания древесины.

Как известно, в цепях переменного синусоидального тока различают активную (среднюю за период)

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = UI \cos \varphi$$

и реактивную мощность

$$Q = UI \sin \varphi,$$

где  $T$  – период;

$u, i$  – мгновенные значения напряжения и тока;

$U, I$  – действующие значения напряжения на нагрузке и тока, протекающего через нагрузку;

$\varphi$  – фазовый сдвиг между напряжением и током.

В цепях высоких и сверхвысоких частот используют сигналы импульсной формы – радио- или видеоимпульсы. В этом случае представляет интерес не только средняя мощность, но и импульсная. При прямоугольной огибающей импульса импульсная мощность  $P_{и}$  и ее среднее значение  $P$  за период  $T$  повторения импульсов связаны соотношением

$$P_{и} = \frac{T}{\tau} P = \gamma P, \quad (1)$$

где  $\tau$  – длительность импульса;

$\gamma$  – скважность последовательности импульсов.

Практически измеряют среднюю мощность  $P$  и по формуле (1) определяют импульсную  $P_{и}$ .

В СВЧ-лесосушильной камере измеряют поглощаемую нагрузкой (древесиной) мощность или мощность, проходящую к нагрузке. В соответствии с этим используют ваттметры поглощаемой и проходящей мощности. Поглощаемую мощность измеряют тогда, когда нужно определить мощность, отдаваемую источником в согласованную нагрузку.

При измерении мощности на высоких и сверхвысоких частотах определяющую роль имеет согласование полных сопротивлений в тракте передачи энергии. От качества согласования зависит уровень мощности, получаемой от генератора или усилителя, значение отражений в тракте генератор–линия–нагрузка и мощность, поглощаемая нагрузкой. Если нагрузка с полным сопротивлением  $Z_{н} = R_{н} + jX_{н}$  подключена к генератору непосредственно, то генератор с внутренним сопротивлением  $\dot{Z}_{г} = R_{г} + jX_{г}$  отдает в эту нагрузку мощность:

$$P = \frac{U_{г}^2 R_{н}}{(R_{г} + R_{н})^2 + (X_{г} + X_{н})^2},$$

где  $U_{г}$  – действующее значение напряжения на выходе генератора.

При этом наибольшую мощность  $P_{макс}$  генератор будет отдавать нагрузке при комплексно-сопряженном согласовании их сопротивлений, т. е. при  $R_{г} = R_{н}$  и  $X_{г} = -X_{н}$ . Эта мощность называется располагаемой мощностью генератора:  $P_{макс} = U_{г}^2 / 4R_{г}$ . Если нагрузка подключена к генератору через линию передачи, то согласование усложняется. Электромагнитная энергия передается от генератора к нагрузке, как правило, по однородной линии с распределенными параметрами, определяющими ее волновое сопротивление

$$\rho = \sqrt{L/C},$$

где  $L$  – индуктивность;

$C$  – емкость.

Для простоты полагают, что такие линии вносят потери настолько малые, что ими можно пренебречь. И тогда мощность, отдаваемая генератором в согласованную с его сопротивлением линию, нагруженную на любое сопротивление  $Z_{н}$ , определяется по формуле

$$P_{\text{н}} = P_{\text{МАКС}} (1 - |\dot{\Gamma}_{\text{н}}|^2),$$

где  $\Gamma_{\text{н}}$  – коэффициент отражения от нагрузки по напряжению.

Если волновое сопротивление линии передачи согласовано с сопротивлением нагрузки ( $Z_{\text{н}} = \rho$ ), то коэффициент отражения равен нулю и к нагрузке поступает максимальная мощность.

Измерение поглощаемой мощности калориметрическим методом относится к наиболее точным измерениям высокочастотной мощности больших и средних значений практически на любой частоте. Он основан на преобразовании электромагнитной энергии в тепловую.

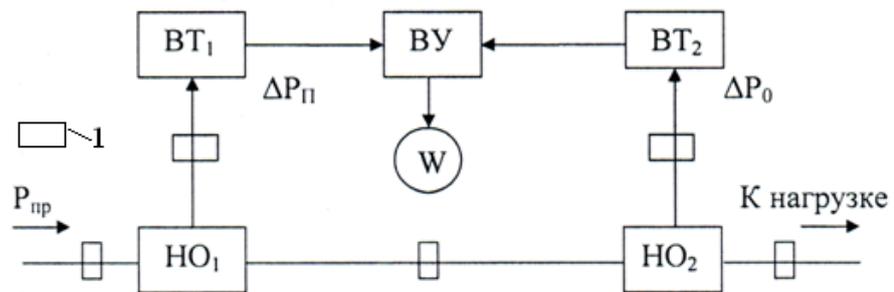
На практике при использовании резонаторной СВЧ-сушильной камеры не удается получить идеальное согласование генератора с нагрузкой. Наряду с мощностью падающей существует и мощность отраженной волны, которая распространяется в обратном направлении, отразившись от нагрузки (пиломатериала) в сушильном штабеле. Тогда мощность проходящей волны  $P_{\text{пр}}$  можно выразить следующим соотношением:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{п}} - P_{\text{о}} = P_{\text{п}} (1 - |\dot{\Gamma}_{\text{н}}|^2), \quad (2)$$

где  $P_{\text{п}}$  и  $P_{\text{о}}$  – мощности падающей (поглощенной) и отраженной волн;

$\Gamma_{\text{н}}$  – коэффициент отражения от нагрузки.

Для измерения проходящей мощности применим метод ответвления, который реализуется с помощью измерительной линии, представляющей собой волновод с направленными ответвителями  $\text{НО}_1$  и  $\text{НО}_2$  [5]. Схема реализации этого метода приведена на рисунке.



Структурная схема измерения проходящей мощности генератора: 1 – волновод измерительной линии;  $\text{НО}_1$ ,  $\text{НО}_2$  – направленные ответвители;  $\Delta P_{\text{п}}$ ,  $\Delta P_{\text{о}}$  – ответвленные мощности падающей и отраженной волн; ВУ – вычитающее устройство; W – магнитоэлектрический измеритель;  $\text{ВТ}_1$  и  $\text{ВТ}_2$  – поглощающие ваттметры

Направленные ответвители  $\text{НО}_1$  и  $\text{НО}_2$  с одинаковыми характеристиками и противоположными ориентациями включены последовательно в линию передачи. Ответвленные мощности падающей  $\Delta P_{\text{п}}$  и отраженной волн  $\Delta P_{\text{о}}$

измеряются поглощающими ваттметрами  $ВТ_1$  и  $ВТ_2$ . Результат измерения каждым ваттметром подается на вычитающее устройство ВУ, на выходе которого включен магнитоэлектрический измеритель  $W$ , проградуированный в единицах мощности. Его показания, в соответствии с формулой (2), пропорциональны проходящей мощности. Для определения поглощенной мощности прибор отградуирован в единицах поглощенной мощности.

При анализе процессов в объемных резонаторах полагают, что диэлектрик, заполняющий объем резонатора, идеален и потери в металле отсутствуют. В тех случаях, когда объем резонатора заполнен воздухом, предположение об идеальности резонатора близко к истине. Резонатор СВЧ-сушильной камеры используется для сушки древесины, которая является природным биокompозитным материалом, содержащим в своем составе множество различных (органических и неорганических) веществ с различной удельной проводимостью, поэтому необходимо учитывать начальную и конечную проводимость древесины, являющуюся нагрузкой резонатора, которая изменяется в процессе сушки.

Таким образом, в реальных условиях объемный резонатор сушильной камеры обладает потерями. В колебательной системе потери мощности на нагревание древесины оценивают добротностью  $Q$ . Это понятие применено для оценки потерь энергии в объемных резонаторах СВЧ-сушильных камер.

Добротность  $Q$  – это отношение энергии  $W$ , запасенной в колебательной системе, к теряемой в этой системе в течение периода колебаний энергии  $W_{\text{ПТ}}$ :

$$Q = 2\pi \frac{W}{W_{\text{ПТ}}}.$$

Энергию потерь  $W_{\text{ПТ}}$  можно выразить как произведение мощности потерь, под которой подразумевается суммарная мощность потерь в диэлектрике  $P_{\text{ПД}}$  и металле объемного резонатора  $P_{\text{ПМЕТ}}$ ,

$$P_{\text{П}\Sigma} = P_{\text{ПД}} + P_{\text{ПМЕТ}},$$

на время (период колебаний  $T_p$ ), соответствующее резонансу:

$$W_{\text{ПТ}} = P_{\text{П}\Sigma} T_p.$$

Период колебаний  $T_p$  связан с частотой колебаний  $f_p$  соотношением  $T_p = 1/f_p$ , следовательно

$$W_{\text{ПТ}} = P_{\text{П}\Sigma} / f_p.$$

При этом

$$Q = 2\pi f_p \frac{W}{P_{\text{П}\Sigma}}, \quad (3)$$

где  $2\pi f_p = \omega_p$  ( $\omega_p$  – угловая резонансная частота).

Выражение (3) является основным для определения добротности колебательной системы.

Полная энергия электромагнитного поля, заключенная в объеме  $V$ :

$$W = \int_V \left( \frac{\mu_a H^2}{2} + \frac{\epsilon_a E^2}{2} \right) dV, \quad (4)$$

где  $\mu_a, \epsilon_a$  – абсолютная магнитная и диэлектрическая проницаемости;

$H$  и  $E$  – мгновенные значения магнитного и электрического полей в объеме  $V$ .

Таким образом, полная энергия поля представляет собой сумму мгновенных значений энергий магнитного и электрического полей. В колебательной системе происходит непрерывное преобразование электрической энергии в магнитную энергию и обратно. Максимальному значению магнитного поля соответствует нулевое значение электрического поля и наоборот. Поэтому вместо суммы мгновенных значений магнитной и электрической энергии в выражении (4) можно использовать их максимальные значения:

$$W = \int_V \frac{\mu_a H_m^2}{2} dV = \int_V \frac{\epsilon_a E_m^2}{2} dV, \quad (5)$$

где  $H_m$  и  $E_m$  – максимальные значения магнитного и электрического полей.

Потери на нагревание древесины, обусловленные взаимодействием микроволновой энергии с материалом и связанные с поглощением мощности облучающей волны, определяются по (3) с учетом того, что  $Q = 1/\text{tg}\delta$ . Энергия электромагнитного поля  $W$ , запасенная в объеме  $V$  резонатора, определяется соотношением (5) для электрической составляющей поля, поскольку магнитная составляющая поля, определяющая потери в металле корпуса сушильной камеры, имеет малые значения. Мощность потерь в древесине  $P_{\text{Пд}}$  характеризуется удельными потерями  $P_{\text{уд}}$ .

Согласно (3) диэлектрические потери при пренебрежении потерями в металле

$$P_{\text{Пд}} = P_{\text{уд}} = W_{\text{Э}}/Q = W_{\text{Э}} \text{tg}\delta = \omega \epsilon_a \text{tg}\delta \int_V |E|^2 dV, \quad (6)$$

где  $W_{\text{Э}}$  – энергия электромагнитного поля, запасенная в объеме  $V$ .

Рассмотрим выражение (6) в соответствии с уравнением баланса мгновенных значений мощностей резонатора лесосушильной камеры в объеме  $V$  в интегральной форме:

$$- \int_V E J_{\text{СТ}} dV = \int_V \sigma E^2 dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left( \frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV + \oint_S [EH] dS.$$

Представим это выражение в соответствии с балансом комплексных мощностей вектора Пойтинга в интегральной форме:

$$\int_V \dot{S}_{\text{СТ.и}} dV = \int_V P_{\text{П.СР}} dV + i2\omega \int_V (W_{\text{М.СР}} - W_{\text{Э.СР}}) dV + \oint_S \dot{P} dS. \quad (7)$$

Здесь левая часть и последнее слагаемое справа – комплексные величины, которые называются соответственно комплексной мощностью стороннего источника в объеме  $V$  и комплексной мощностью, выходящей из поверхности  $S$ , ограничивающей объем  $V$ . Остальные интегралы в (7) вещественные.

Приравняв в выражении (7) вещественные части слева и справа, получим

$$\int_V P_{\text{ст.ср}} dV = \int_V P_{\text{п.ср}} dV + \oint_S P_{\text{ср}} dS, \quad (8)$$

которое можно представить в виде

$$P_{\text{ст.ср}} = P_{\text{п.ср}} + \frac{\partial w}{\partial t} + P_{\text{и.ср}},$$

где  $P_{\text{ст.ср}}$  – мощность электромагнитного поля сторонних источников;

$P_{\text{п.ср}}$  – мощность потерь, расходуемая на нагрев древесины,

$$P_{\text{п.ср}} = \int_V \sigma E^2 dV;$$

$\partial w / \partial t$  – мощность, расходуемая на изменение энергии  $w$  в объеме  $V$ ;

$P_{\text{и.ср}}$  – мощность поля, выходящая сквозь замкнутую поверхность  $S$ , ограничивающую объем  $V$ .

Поскольку среднее значение энергии электромагнитного поля в объеме  $V$  при установившемся процессе не изменяется во времени,  $\partial w_{\text{ср}} / \partial t = 0$ , то можно представить его в следующем виде:

$$P_{\text{ст.ср}} = P_{\text{п.ср}} + P_{\text{и.ср}}. \quad (9)$$

Вещественные части комплексных мощностей, равные средним за период значениям мощностей, называют активными мощностями. Соотношения (8), (9) выражают баланс средних за период значений мощностей.

Приравнявая в (7) мнимые части, получим:

$$P_{\text{р.ст}} = 2\omega \int_V (W_{\text{м.ср}} - W_{\text{э.ср}}) dV + \text{Im} \oint_S \dot{P} dS, \quad (10)$$

где  $P_{\text{р.ст}} = -\frac{1}{2} \text{Im} \int_V \dot{E} J_{\text{ст}}^* dV$  – мнимая часть стороннего источника, называемая

реактивной мощностью этого источника;

$J_{\text{ст}}^*$  – комплексно-сопряженная плотность электрического тока.

Среднее значение амплитуды мгновенной реактивной мощности источника за период равно нулю, так как она связана с колебательным характером движения энергии. В течение четверти периода реактивная энергия переходит из источников в электромагнитное поле и поглощается активным сопротивлением резонатора, двигаясь в одном направлении, в течение следующей четверти периода эта энергия возвращается из электромагнитного поля в источник и поглощается активным сопротивлением генератора, двигаясь в другом направлении. Соотношение (10), представляющее баланс реактивных мощностей комплексного вектора Пойтинга (7), показывает, что реактивная мощность источника  $P_{\text{р.ст}}$  определяется разностью средних значений энергий маг-

нитного и электрического полей в объеме  $V$  и мнимой части потока вектора  $\vec{P}$  через поверхность  $S$ , ограничивающую объем  $V$ .

Полагаем, что резонатор лесосушильной камеры представляет собой изолированную область  $V$ , для которой поток  $\vec{P}$  сквозь ограничивающую ее поверхность  $S$  равен нулю. Тогда для изолированного объема выражения (8) – (10) имеют следующий вид для активной и реактивной составляющих:

$$P_{\text{ст.ст}} = P_{\text{п.ст}}; P_{\text{р.ст}} = 2\omega(W_{\text{м.ст}} - W_{\text{э.ст}}),$$

что соответствует режиму согласования комплексного источника  $\dot{S}_{\text{ст.и}}$  с нагрузкой резонатора лесосушильной камеры (реактивная энергия вся находится в замкнутом объеме  $V$ ). При измерении проходящей мощности отраженная волна отсутствует и  $P_{\text{пр}} = P_{\text{п}}$ .

Если при этом средние значения энергий электрического и магнитного полей в объеме  $V$  равны ( $W_{\text{м.ст}} = W_{\text{э.ст}}$ ), то мощность стороннего источника (генератора) активна ( $P_{\text{р.ст}} = 0$ ) и в изолированной области имеет место резонанс. Обмен реактивной энергией резонатора с источником (генератором) происходит с дополнительными потерями как в том, так и в другом.

Поскольку энергия электромагнитного поля  $W$ , запасенная в объеме  $V$  резонатора, определяется соотношением (5), то мощность электрической составляющей поля  $P_{\text{э}}$ , сосредоточенную в объеме  $V$  и затраченную на его образование, определяет интеграл

$$\int_V \epsilon_a \frac{\partial E}{\partial t} E dV = P_{\text{э}}, \quad (11)$$

который характеризует мощность электрического поля  $P_{\text{э}}$ , сосредоточенную в объеме  $V$ , затраченную на его образование.

Энергию электромагнитного поля, запасенную в объеме  $V$ , затраченную на образование этого поля, можно определить интегрированием по времени выражения (11), определяющего мощность электрического поля:

$$W_{\text{э}} = \int_0^t P_{\text{э}} dt = \int_0^t \int_V \epsilon_a \frac{dE}{dt} E dV dt, \quad (12)$$

где выражение  $\frac{dE}{dt} dt = dE$  представляет собой дифференциал поля  $E$  и является изменяемой от мощности потерь  $P_{\text{э}}$  величиной в соответствии с выражением (3) для добротности  $Q$ .

Интеграл по времени при этом переходит в интеграл по полю  $E$ . Предполагая, что в момент времени  $t = 0$  поле отсутствует, а в произвольный момент  $t$  равняется  $E$ , выражение для электрической энергии можно записать в следующем виде:

$$W_{\text{э}} = \int_V \int_0^E \epsilon_a E dE dV;$$

$$W_{\text{э}} = \int_V \frac{\epsilon_a E^2}{2} dV. \quad (13)$$

Выражение (13) дает возможность вычислить значение энергии электрического поля, сосредоточенной в объеме  $V$ . Подынтегральное выражение представляет собой объемную плотность электрической энергии:

$$\Delta W_{\text{э}} = \epsilon_a E^2 / 2.$$

В соответствии с соотношением (3), поскольку тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрического материала (древесины)  $\text{tg}\delta = \sigma / \omega \epsilon_a$

$$P_{\text{уд}} = \sigma_{\text{э}} \int_V |E|^2 dV. \quad (14)$$

где  $\sigma_{\text{э}}$  – удельная электрическая проводимость среды.

В процессе высушивания древесины снижается удельная диэлектрическая проводимость. Из выражения (14) следует, что при уменьшении проводимости  $\sigma_{\text{э}}$ , увеличивается напряженность поля  $E$  в соответствии с выражением (12). Это объясняется тем, что добротность  $Q$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  являются обратными величинами:

$$Q = 1/\text{tg}\delta.$$

Таким образом, с учетом (12)–(14) удельные потери  $P_{\text{уд}}$  остаются неизменными в процессе сушки, пока принудительно не изменить подводимую мощность генератора.

Добротность нагруженных резонаторов может быть определена в соответствии с выражением (3) для добротности  $Q$  ненагруженного резонатора.

Если резонатор нагружен, то к средней мощности потерь в резонаторе  $P_{\text{п}\Sigma}$  следует прибавить среднюю мощность, отдаваемую резонатором в нагрузку  $P_{\text{н}}$ , поскольку нагрузкой резонатора являются диэлектрические потери в древесине, загруженной в резонансную сушильную камеру.

Запишем выражение для добротности нагруженного резонатора:

$$Q_{\text{н}} = \omega_p \frac{W}{P_{\text{п}\Sigma} + P_{\text{н}}} = \omega_p \frac{W}{P_{\text{п}\Sigma}} \frac{1}{1 + P_{\text{н}}/P_{\text{п}\Sigma}} = Q \frac{1}{1 + P_{\text{н}}/P_{\text{п}\Sigma}}, \quad (15)$$

где  $\omega_p = 2\pi f_p$  – угловая резонансная частота резонатора.

Таким образом, в СВЧ-лесосушильной камере резонаторного типа следует обеспечивать оптимальное согласование генератора с резонатором и поддерживать его в процессе сушки древесины.

Добротность нагруженного резонатора СВЧ-лесосушильной камеры позволяет осуществлять измерение и контроль текущей влажности пиломатериалов в процессе сушки, а также согласование генератора с поглощаемой нагрузкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галкин В.П.* Древесиноведческие аспекты инновационной технологии сушки древесины: моногр. М.: МГУЛ, 2010. 238 с.
2. *Гареев Ф.Х.* Проблемы и перспективы СВЧ-сушки древесины // Журн. ЛПИ. 2004. № 1. С 50–52.
3. *Коптелова Е.Н., Кузнецова Л.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И.* Интенсификация процесса выделения бетулина из бересты с использованием СВЧ-поля // Лесн. журн. 2013. №5. С. 193–201. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. *Недорезова Е.В.*, Совершенствование технологии и оборудования для сушки древесины электромагнитной энергией СВЧ: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2002. – 154 с.
5. *Пюшнер Г.* Нагрев энергией СВЧ. М.: Энергия, 1968. 310 с.
6. *Серговский П.С., Расев А.И.* Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 360 с.
7. *Шульгин В.А.* Измерительные аспекты инновационной технологии сушки древесины // Альманах современной науки и образования. 2011. №4. С. 95–96.
8. *Шульгин В.А.* Особенности сушки древесины // Альманах современной науки и образования. 2013. №3. С. 215–218.
9. *Шульгин В.А.* Особенности сушки древесины (возникновение электрического пробоя) // Альманах современной науки и образования. 2013. №3. С. 219–222.

Поступила 26.12.2013

УДК 674.047:66.047.354

**Resonance Phenomena in the Process of Wood Microwave Drying**

*V.I. Melekhov, Doctor of Engineering, Professor*

*V.A. Shulgin, Senior Lecturer*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russia; e-mail: v.shulgin@agtu.ru

Currently drying of wood with the use of electromagnetic energy in a camera of resonator type is developed intensively. The most efficient is the range of ultra-high frequency. Results of the study of fundamental properties of wood, the processes occurring in the wood when exposed by electromagnetic field of different frequencies, as well as models of microwave energy absorption by unit assortments and lumber stack are given in various scientific sources, where the questions of thermal drying of wood are considered, but are poorly elucidated the control process of drying and electrical phenomena. This does not allow for optimum control and automatic control of the drying process of wood, which may result in such negative effects as an increase in the temperature and electrical breakdown in the timber and the volume of the resonator, deformation and warpage of the drying timber. In difference of wood drying in the convection machine the process of resonator-type with the use of ultrahigh frequency has its own characteristics, which are characterized by resonant electro phenomena, occurred in the cavity, which may be considered on the basis of the basic provisions of electrodynamics. The purpose of this work – is on the basis of the functional dependence of resonator to carry out the measurement and control of the drying process of

wood. It is considered the electrical phenomena, peculiar to resonator of ultrahigh frequency drying camera of wood, analytical expressions of power balance of electromagnetic Poynting vector coefficients are given, allowing establish the optimal mode of drying.

*Keywords:* microwave drying of wood, resonator, factor of quality of the resonance camera, loss-angle tangent, electromagnetic energy, specific dielectric absorption loss, penciled power.

#### REFERENCES

1. Galkin V.P. Drevesinovedcheskie aspekty innovatsionnoy tekhnologii sushki drevesiny: monografiya [Wood Directing Aspects of Innovative Wood Drying: a Monography]. Moscow, 2010. 238 p.
2. Gareev F.Kh. Problemy i perspektivy SVCh-sushki drevesiny [Problems and Prospects of Microwave Wood Drying]. Zhurnal LPI, 2004, no. 1, pp. 50–52.
3. Koptelova E.N., Kuznetsova L.N., Kutakova N.A., Tretyakov S.I. Intensifikatsiya protsessa vydeleniya betulina iz beresty s ispol'zovaniem SVCh-polya [Intensification of Betulin Isolation from Birch Bark Using Microwave Field]. Lesnoy zhurnal, 2013, no. 5, pp. 193–201.
4. Nedorezova E.V. Sovershenstvovanie tekhnologii i oborudovaniya dlya sushki drevesiny elektromagnitnoy energiy SVCh: diss.kand.tech.nauk [Improving of Technology and Equipment for Wood Drying Microwave Electromagnetic Energy: Cand. Tech. Sci. Diss.]. Voronezh, 2002. 154 p.
5. Pyushner G. Nagrev energiy SVCh [Heating by Microwave Frequency Energy]. Moscow, 1968. 310 p.
6. Sergovskiy P.S., Rasev A.I. Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny [Hydrothermal Treatment and Preservation of Wood]. Moscow, 1987. 360 p.
7. Shul'gin V.A. Izmeritel'nye aspekty innovatsionnoy tekhnologii sushki drevesiny [Measuring Aspects of the Innovative Technology of Drying Wood]. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*, Tambov, 2011, no. 4 (47), pp. 95–96.
8. Shul'gin V.A. Osobennosti sushki drevesiny [Features of Wood Drying]. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*, Tambov, 2013, no. 3(70), pp. 215–218. ISSN 1993-5552.
9. Shul'gin V.A. Osobennosti sushki drevesiny (vozniknovenie elektricheskogo proboya) [Features of Wood Drying (Occurrence of Electrical Breakdown)]. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*, Tambov, 2013, no. 3, pp. 219–222.

Received on December 26, 2013

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.135

---