

УДК 674.047:66.047.354

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.122

## **КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В СВЧ-ЛЕСОСУШИЛЬНОЙ КАМЕРЕ РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА**

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

*В.А. Шульгин, ст. преп.*

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

Сушка древесины является важнейшей составляющей технологического процесса ее переработки, во многом определяющей качество конечного продукта, поэтому совершенствованию технологии сушки пиломатериалов придается большое значение. Из существующих в настоящее время методов представляет интерес сушка пиломатериалов с применением электромагнитной энергии. В связи с этим появилась необходимость в разработке высокотехнологичных устройств для сушки древесины в сверхвысокочастотном поле, работающих в автоматическом режиме с учетом особенностей энергетических характеристик резонатора сушильной камеры. Это возможно выполнить с помощью систем технического контроля и управления процессом сушки с применением соответствующего программного обеспечения. Для создания таких систем необходимо разработать измерительное устройство, которое должно учитывать взаимозависимость энергетических параметров резонатора. В статье рассмотрен научно обоснованный подход к решению задачи автоматического контроля за процессом сушки древесины в микроволновой лесосушильной камере резонаторного типа. Представлена математическая модель определяющей части системы бесконтактного контроля – функционального измерителя влажности древесины, основанного на взаимосвязи энергетических параметров резонатора сушильной камеры. Объектом настоящего исследования является процесс сушки древесины сверхвысокочастотным электромагнитным полем в экспериментальной сушильной установке резонаторного типа. Цель исследования – создание системы измерительного контроля за процессом сушки древесины с применением средств термовлагодетриции пиломатериалов, основанной на определении энергетических параметров резонатора сушильной камеры. Для решения поставленной задачи предложен способ сушки древесины в микроволновой лесосушильной камере.

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

В отличие от сушки пиломатериала в конвективных установках процесс в СВЧ-сушильных камерах резонаторного типа сопровождается резонансными электрофизическими явлениями, которые могут быть рассмотрены на основе базовых положений электродинамики [1, 2, 4, 5, 7, 8, 10–12].

Для повышения качества сушки древесины в микроволновой сушильной камере необходимо в обязательном порядке осуществлять измерительный контроль градиентов влажности и температуры древесины.

В настоящее время для решения комплекса задач влагометрии в радиоволновом диапазоне излучения токов высоких (ТВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот известны следующие электродинамические методы:

свободного пространства с использованием проходящей и отраженной волн (в этих модификациях измеряемой характеристикой могут служить затухание (модуль коэффициента передачи или коэффициент отражения), изменение амплитуды или фазы волны);

резонансные;  
волноводные;  
зондовые.

Возможность применения радиоволновых методов для определения влажности материалов основывается на физических явлениях поглощения и рассеяния радиоволн материалом. Однако в настоящее время не существует микроволновых методов и устройств, способных одновременно решать комплекс существующих задач влагометрии, т. е. их сочетание при соблюдении адекватности.

Традиционные способы контроля влажности древесины в процессе сушки материала в СВЧ-сушильной камере резонаторного типа (весовой и кондуктометрический) не позволяют осуществлять непрерывный измерительный контроль влажности древесины в электромагнитном поле резонатора из-за особенностей его воздействия на разные материалы (диэлектрики, ферромагнетики, парамагнетики). По П.С. Серговскому, А.И. Расеву [6, с. 191], «для контроля текущей влажности пиломатериалов в СВЧ-сушильных камерах в процессе сушки эти способы в их чистом виде не применимы».

Для определения и контроля влажности пиломатериала может быть использован один из резонансных методов – метод стоячей волны, который позволяет на основе функциональной зависимости измерять интегральную влажность древесины в зоне взаимодействия электромагнитного поля с материалом.

На измерительную характеристику влажности древесины существенное влияние оказывают виды и формы связи влаги с веществом. Основываясь на классификации видов и форм связи влаги [3], можно отметить, что существенной является определяемая величина энергии связи  $E$  для коллоидных капиллярно-пористых тел, к которым относится древесина. Большинство литературных источников и нормативных документов, применяемых на практике (стандарты, технологические инструкции и т.п.), рассматривают процесс СВЧ-сушки древесины с учетом удаления только свободной влаги (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 80,0$ ), в то время как химически связанная влага имеет значительно меньшую ( $\epsilon_{\text{хсв}} = 4,5...5,8$ ) [9].

Объектами настоящего исследования являются процесс сушки древесины электромагнитным полем СВЧ в экспериментальной сушильной установке

резонаторного типа и создание системы измерительного контроля процесса сушки древесины с применением средств термовлагометрии пиломатериалов, основанной на определении энергетических параметров резонатора сушильной камеры.

Исследование отдельных вопросов проблемы сушки пиломатериалов в камерах СВЧ проводили В.П. Галкин [1], Ф.Х. Гареев [2] и др. Анализ состояния вопроса во влагометрии и сушке древесины, выполненный на основании патентной базы по рассматриваемой тематике и ознакомлении с научными публикациями [2, 5], позволяет сделать вывод о необходимости проведения специальных исследований по повышению точности измерения и контроля влажности древесины в поле СВЧ.

В ходе исследований выполнено теоретическое обоснование и проведена экспериментальная проверка применяемого метода стоячей волны в резонансной камере для сушки древесины в поле СВЧ, доказана возможность безконтактного измерения и контроля влажности древесины в камерах СВЧ при одновременном контроле параметров агента сушки и материала, базирующемся на основе функционально связанных энергетических характеристик резонатора лесосушильной камеры и упрощении аппаратной реализации.

В рассматриваемом случае контроль влажности древесины осуществляется постоянно в течение процесса сушки. Высушиваемые пиломатериалы, уложенные в сушильный штабель, помещают в замкнутую металлическую полость – резонатор лесосушильной камеры. Возбуждается СВЧ электромагнитное поле. Размеры резонатора лесосушильной камеры выбирают много больше длины волны ( $\lambda$ ) питающего генератора СВЧ, чтобы обеспечить возможность возбуждения в ненагруженном состоянии в резонаторе множества колебаний разной пространственной структуры при постоянной мощности питающего генератора и фиксированном времени взаимодействия исследуемого влажного материала с полем многих мод (мода – наибольшее значение функции распределения случайной величины). Измеряют температуру подвергающегося воздействию электромагнитной энергии материала до помещения в замкнутую металлическую полость и после воздействия электромагнитного поля многих мод, по разности температур определяют калориметрическим способом поглощаемую мощность  $P_{\text{полг}}$ .

Основываясь на энергетических параметрах резонатора, добротности ненагруженного резонатора (холостого хода)  $Q$  и затухания  $d$  (величина обратная добротности  $d = 1/Q$ ), находим затухание резонатора, исходя из следующего энергетического соотношения:

$$Q = \omega_p \frac{W_k}{P_{\text{п}\Sigma}}, \quad (1)$$

где  $\omega_p$  – резонансная угловая частота;

$W_k$  – энергия, запасенная в колебательной системе;

$P_{\text{п}\Sigma}$  – мощность потерь холостого хода в резонаторе.

Нагрузкой является влага, содержащаяся в древесине. Если резонатор нагружен, то к средней мощности потерь в резонаторе  $P_{\text{пс}} = P_{\text{г}}$  ( $P_{\text{г}}$  – подводенная мощность генератора) следует прибавить среднюю мощность, отдаваемую резонатором в нагрузку (расходуемую на нагрев древесины в сушильной камере)  $P_{\text{н}} = P_{\text{погл}}$ . Запишем выражения для добротности и затухания нагруженного резонатора:

$$Q_{\text{н}} = Q \frac{1}{1 + P_{\text{н}}/P_{\text{г}}}; \quad (2)$$

$$d_{\text{н}} = \frac{1}{Q} = d(1 + P_{\text{н}}/P_{\text{г}}). \quad (3)$$

По приведенному соотношению (3) для затухания  $d_{\text{н}}$  находим интегральное значение средней влажности материала в сушильной камере, вычисленное по формуле для поглощенной мощности  $P_{\text{погл}}$  калориметрическим способом. Поскольку влажность древесины пропорциональна потерям передаточной функции, т. е. вносимому в резонатор затуханию  $A$  при отсутствии согласования в тракте передачи, имеем

$$A = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{г}}}. \quad (4)$$

Текущая влажность древесины  $W$  устанавливается по функции затухания  $d_{\text{н}}$  калибровкой измерителя:

$$W = [(M - M_0)/M_0]100\%, \quad (5)$$

где  $M$  – масса влажной древесины;

$M_0$  – масса абс. сухой древесины.

Особенностью сушки древесины резонансным методом стоячей волны является рассогласование нагрузки с генератором вследствие уменьшения мощности удельных потерь нагрузки в технологическом процессе сушки и, как следствие, увеличение добротности резонатора сушильной камеры. Необходимо с заданной дискретностью времени уменьшать мощность питающего генератора в соответствии с соотношением для затухания  $d_{\text{н}}$ .

Для осуществления контроля процесса сушки древесины необходимо выполнять алгоритм процесса сушки для функции затухания первичного измерительного преобразователя (ПИП), вычисляя мощность генератора СВЧ (или генераторов)  $P_{\text{г}}$  на каждом дискретном шаге с соответствующей регулировкой мощности.

Рассмотрим примеры реализации предлагаемого способа контроля для различной подводенной мощности.

**Пример 1.** При фиксированной выходной мощности питающего генератора СВЧ ( $P_{\text{вых}} = 15$  кВт) задается время взаимодействия  $t$  высушиваемой древесины с полем многих мод в резонансной камере. Измеряя температуру исследуемого материала перед помещением в замкнутый объем ( $T_1$ , °C), а затем температуру материала после взаимодействия ( $T_2$ , °C) находим их разность  $\Delta T = T_2 - T_1$ , используя калориметрический способ измерения поглощенной мощности:

$$P_{\text{погл}} \frac{cv\Delta T}{0,24t} \approx 4,18 \cdot 10^3 \frac{v}{t} \Delta T, \quad (6)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость;  
 $v$  – объем жидкости.

Для энергетического параметра резонатора затухания  $d_n$  получена зависимость затухания (3), в которую подставляем значение практической добротности резонатора сушильной камеры на холостом ходу:  $Q_{xx} \approx 100$ ;  $P_{пз} \approx P_r$ . Поэтому для мощности магнетрона (генератора)  $P_r = 15$  кВт получаем:

$$d_n = \frac{1}{Q} = W = 0,01(1 + P_n/15)100 \%. \quad (7)$$

Здесь  $P_r = P_{\text{погл}}$  – переменная,  $P_r$  – параметр, который в процессе высушивания материала уменьшается в соответствии с изменением влажности.

Градуировочная характеристика ПИП для измерителя влажности после калибровки затухания резонатора сушильной камеры по формуле (5) приведена на рис. 1.

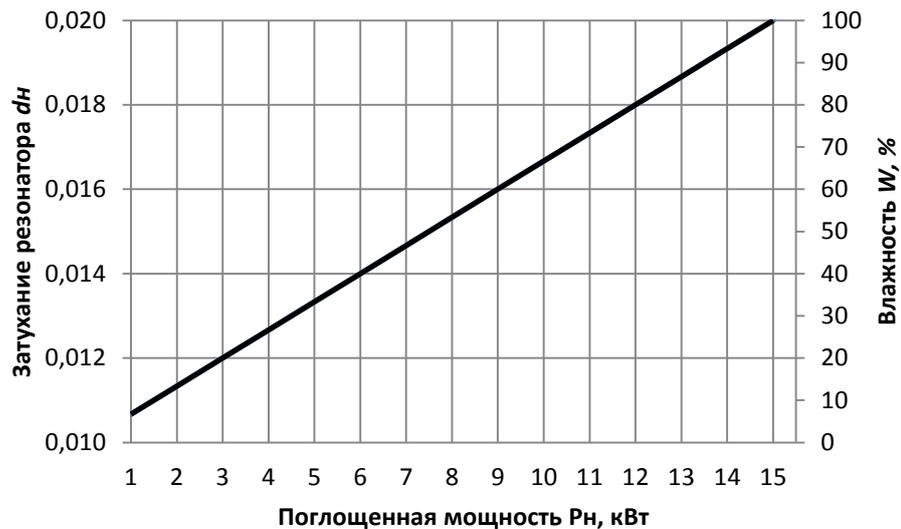


Рис. 1. Градуировочная характеристика ПИП измерителя влажности ( $P_r = 15$ кВт)

Например, при шаге измерения влажности 10 % получаем характеристику (рис. 2) при регулировке мощности в процессе контроля технологического процесса сушки.

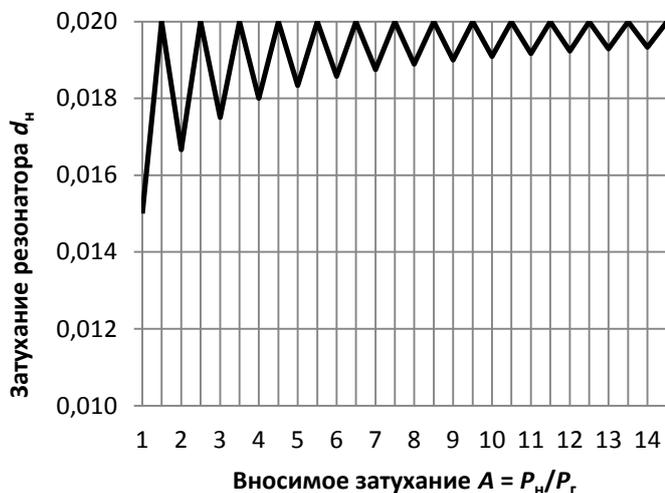


Рис. 2. Характеристика регулировки затухания резонатора в процессе сушки древесины ( $P_r = 15$  кВт)

Пример 2. При выходной мощности питающего генератора  $P_{\text{вых}} = 1$  кВт при начальной влажности древесины 100 %, применяя calorиметрический способ измерения поглощенной мощности, для энергетического параметра резонатора (затухания  $d_n$ ) получаем график зависимости затухания, откалиброванный в единицах влажности (рис. 3). Процесс протекает идентично приведенному в примере 1:

$$d_n = \frac{1}{Q} = d(1 + P_{\text{погл}}/1).$$

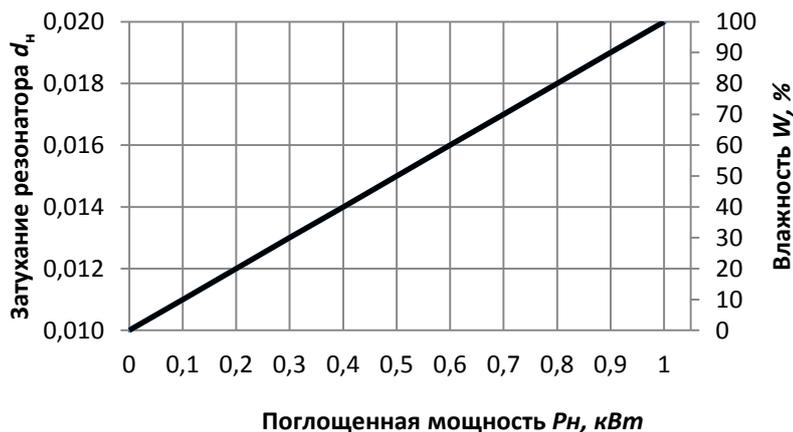


Рис. 3. Градуировочная характеристика ПИП измерителя влажности ( $P_r = 1$  кВт)

Тогда в процессе сушки при шаге измерения влажности 10 % параметр, которым является выходная мощность генератора, принимает следующие значения: 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1 кВт. Характеристика контроля процесса сушки древесины для выходной мощности сушильной установки  $P_{г}$ , откалиброванная на 100 % влажности материала при максимальной поглощаемой мощности, приведена на рис. 4.

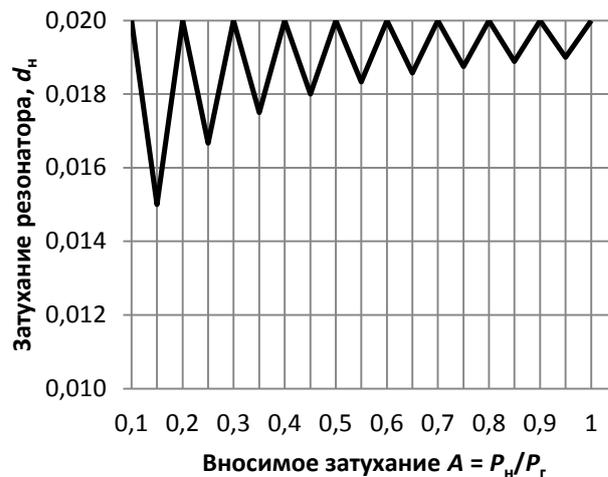


Рис. 4. Характеристика регулировки затухания резонатора в процессе сушки древесины ( $P_{г} = 1$  кВт)

Таким образом, измерительный контроль процесса сушки пиломатериала в микроволновой лесосушильной камере резонансным методом стоячей волны позволяет обеспечить: непрерывное определение градиентов влажности и температуры; регулирование подводимой мощности; повышение точности определения влажности древесины; упрощение аппаратной реализации. Выполненное согласование мощности генератора и поглощенной в нагрузку мощности (в сушильном штабеле) дает возможность поддерживать оптимальный режим процесса сушки и получать высокое качество высушиваемой древесины.

#### 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. Казанский М.Ф. Анализ форм связи и состояние влаги, поглощенной дисперсным телом, с помощью кинетических кривых сушки // ДАН СССР. 1960. № 5. С. 89–92.

4. Мелехов В.И., Шульгин В.А. Резонансные явления в процессе СВЧ-сушки древесины // Лесн. журн. 2015. № 5. С. 135–145. (Изв. высш. учеб. заведений).
5. Недорезова Е.В. Совершенствование технологии и оборудования для сушки древесины электромагнитной энергией СВЧ: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2002. 154 с.
6. Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 360 с.
7. Торговников Г.И., Кодеба С.Д. Сушка древесной стружки в сверхвысокочастотном электромагнитном поле // Лесн. журн. 1984. № 2. С. 75–78. (Изв. высш. учеб. заведений).
8. Торговников Г.И., Котов Ю.В., Мануйлов Н.А., Савин В.Б. Диэлектрические свойства древесины на сверхвысоких частотах // Лесн. журн. 1977. № 1. С. 89–95. (Изв. высш. учеб. заведений).
9. Чудинов Б.С. Вода в древесине: моногр. Новосибирск: Наука, 1984. 263 с.
10. Шульгин В.А. Измерительные аспекты инновационной технологии сушки древесины // Грамота. 2011. №4. С. 95–96. (Альманах современной науки и образования).
11. Шульгин В.А. Особенности сушки древесины // Грамота. 2013. № 3. С. 215–218. (Альманах современной науки и образования).
12. Шульгин В.А. Особенности сушки древесины (возникновение электрического пробоя) // Грамота. 2013. №3. С. 219–222. (Альманах современной науки и образования).

Поступила 07.02.14

UDC 674.047:66.047.354

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.122

### **Control of Lumber Drying Process in the Microwave Cavity-Type Wood-Drying Kiln**

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

*V.A. Shul'gin, Senior Lecturer*

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

Wood drying is the most important component of the technological wood processing, largely determines the quality of the final product. Development of lumber drying technology is of great importance. Drying lumber with the use of electromagnetic energy is of great interest among the currently existing methods of drying of wood. In this regard, there is a need to develop high-tech devices for drying of wood in the microwave field, working in automatic mode taking into account the energy characteristics of the cavity of a kiln. It can be done with the help of technical control systems and drying process management with the use of appropriate computer software. To create such systems it is necessary to develop a measuring unit, which can take into account the interdependence of the cavity energy parameters. The article describes the scientifically grounded method of solving the problem of automatic control of the process of wood drying in a microwave cavity-type wood-drying kiln. A mathematical model of a defined component part of the noncontact inspection system – the functional wood moisture meter based on the interconnection of energy parameters of the cavity of a wood-drying kiln is represented. The results of the research of wood drying

process in MW electromagnetic field in a cavity-type wood-drying kiln are demonstrated. The measuring control system of drying process with the use of water content measurements resources of wood is considered.

*Keywords:* microwave drying of wood, cavity, Q-factor of the resonance chamber, dielectric loss tangent, electromagnetic energy, specific dielectric losses, primary transducer, power delivered.

#### REFERENCES

1. Galkin V.P. *Drevesinovedcheskie aspekty innovatsionnoy tekhnologii sushki drevesiny* [Wood Technology Aspects of Innovative Wood Drying]. Moscow, 2010. 238 p.
2. Gareev F.Kh. Problemy i perspektivy SVCh-sushki drevesiny [Problems and Prospects of Microwave Drying of Wood]. *Zhurnal LesPromInform*, 2004, no. 1, pp. 50–52.
3. Kazanskiy M.F. Analiz form svyazi i sostoyanie vlagi, pogloshchennoy dispersnym telom, s pomoshch'yu kineticheskikh krivykh sushki [Analysis of the Forms of Communication and State of Moisture Absorbed by the Dispersed Body with Kinetic Curves of Drying]. *Doklad Akademii nauk SSSR* [Report of the Academy of Sciences of the USSR], 1960, no. 5, pp. 89–92.
4. Melekhov V.I., Shul'gin V.A. Rezonansnye yavleniya v protsesse SVCh-sushki drevesiny [Resonance Phenomena in the Microwave Drying of Wood]. *Lesnoy zhurnal*, 2014, no. 1, pp. 89–95.
5. Nedorezova E.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii i oborudovaniya dlya sushki drevesiny elektromagnitnoy energiy SVCh: dis... kand. tehn. nauk* [Improving the Technology and Equipment for Wood Drying by Microwave Electromagnetic Energy: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Voronezh, 2002. 154 p.
6. Sergovskiy P.S., Rasev A.I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny* [Hydrothermal Treatment and Preservation of Wood]. Moscow, 1987. 360 p.
7. Torgovnikov G.I., Kodeba S.D. Sushka drevesnoy struzhki v sverkhvysokochastotnom elektromagnitnom pole [Drying of Wood Chips in the Microwave Electromagnetic Field]. *Lesnoy zhurnal*, 1984, no. 2, pp. 75–78.
8. Torgovnikov G.I., Kotov Yu.V., Manuylov N.A., Savin V.B. Dielektricheskie svoystva drevesiny na sverkhvysokikh chastotakh [Dielectric Properties of Wood at Microwave Frequencies]. *Lesnoy zhurnal*, 1977, no. 1, pp. 89–95.
9. Chudinov B.S. *Voda v drevesine* [Water in Wood]. Novosibirsk, 1984. 263 p.
10. Shul'gin V.A. Izmeritel'nye aspekty innovatsionnoy tekhnologii sushki drevesiny [Measuring Aspects of Innovative Wood Drying]. *Gramota*, 2011, no. 4, pp. 95–96.
11. Shul'gin V.A. Osobennosti sushki drevesiny [Features of Wood Drying]. *Gramota*, 2013, no. 3, pp. 215–218.
12. Shul'gin V.A. Osobennosti sushki drevesiny (vozniknovenie elektricheskogo proboya) [Features of Wood Drying (Occurrence of Electrical Breakdown)]. *Gramota*, 2013, no. 3, pp. 219–222.

Received on February 07, 2014

---