

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

В.П. Галкин¹, А.А. Горяев², Н.Б. Баланцева², О.А. Калиничева², А.А. Калинина¹¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1² ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17

vgalkin@mgul.ac.ru

Для качественной высокочастотной сушки древесины требуется электромагнитное поле с равномерными характеристиками. В статье рассмотрены принципы выравнивания поля в рабочем конденсаторе, позволяющие сушить длинномерные сортименты, и приведены способы снижения неравномерности нагрева пиломатериалов в различном диапазоне частот электромагнитного излучения. Показано, что в средневолновом диапазоне частот стоячие волны не оказывают заметного влияния на распространение поля вдоль конденсатора. В высокочастотном диапазоне 5...15 МГц длину конденсатора и частоту тока необходимо увязывать. Предлагается два способа. Первый — подключение ВЧ-генератора в двух-трех точках по длине конденсатора. Второй — подключение регулируемых индуктивностей в точках подключения ВЧ-генератора. Для уменьшения неравномерности нагрева штабеля по сечению предлагается трехэлектродный конденсатор.

Ключевые слова: высокочастотная сушка, неравномерность нагрева, частота тока, конденсатор, стоячие волны, пучности напряжения

Ссылка для цитирования: Галкин В.П., Горяев А.А., Баланцева Н.Б., Калиничева О.А., Калинина А.А. Особенности высокочастотной сушки пиломатериалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 4. С. 73–77. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-73-77

Высокочастотная сушка пиломатериалов осуществляется с помощью электрического конденсатора, между пластинами которого помещают древесину. Конденсатор может состоять из двух и более пластин. Длина конденсатора для сушки стандартного штабеля пиломатериалов — 6 метров.

Высокочастотная сушка, по сравнению с конвективной менее продолжительна и обеспечивает более высокое качество сухой древесины. В то же время для получения высокого качества необходимо решить задачу подвода электромагнитной энергии к материалу, обладающему неодинаковыми электрическими характеристиками разных участков. Значения влажности сырой доски изменяются даже по длине одной доски, что выражается в различии электрических показателей: величины активного и реактивного сопротивления, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Чтобы качественно сушить древесину, необходимо исключить неравномерность влажности в локальных областях пиломатериалов [1–8].

Удельные мощности, поглощаемые пиломатериалами с различной влажностью, определяются отношением [4]:

$$\frac{P_{y2}}{P_{y1}} = \frac{E_2^2 \varepsilon_2' \operatorname{tg} \delta_2}{E_1^2 \varepsilon_1' \operatorname{tg} \delta_1} = \frac{E_2^2 \varepsilon_2''}{E_1^2 \varepsilon_1''}, \quad (1)$$

где P_{y2} и P_{y1} — удельные мощности, выделяемые в пиломатериалах с меньшей и большей влажностью;

E_2 и E_1 — напряженность электрического поля в пиломатериалах с меньшей и большей влажностью;

ε_2' и ε_1' — коэффициенты диэлектрических проницаемостей менее влажных и более влажных пиломатериалов;

$\operatorname{tg} \delta_2$ и $\operatorname{tg} \delta_1$ — тангенсы угла диэлектрических потерь менее влажных и более влажных пиломатериалов;

ε_2'' и ε_1'' — диэлектрические потери менее влажных и более влажных пиломатериалов.

Удельная мощность, выделяемая в материале, определяется выражением:

$$P_y = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (2)$$

где U — напряжение, В;

ω — угловая частота;

C — емкость рабочего конденсатора,

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon' S}{d}, \Phi. \quad (3)$$

Неравномерность нагрева может возникать не только по ширине, но и по длине конденсатора из-за характера распространения электромагнитной волны. Вдоль конденсаторных пластин распространение электромагнитной волны в $\sqrt{\varepsilon'}$ раз больше, чем в пиломатериалах. Поэтому электромагнитная волна, дойдя до конца штабеля, отражается и направляется навстречу следующей волне. В результате образуются стоячие волны и возникают пучности и узлы напряжения и тока. Максимум выделения тепла происходит в пучностях. Чтобы нагрев был более равномерным, расстояние от точки присоединения фидера до конца штабеля пиломатериалов не должна превышать 10 % длины волны. Допустимая длина конденсатора L_{\max} определяется выражением [10]

$$L_{\text{макс}} = \frac{a \cdot 10^7}{f \sqrt{\epsilon'}}, \quad (4)$$

где a — коэффициент, равный 3; 4; 6 в зависимости от неравномерности напряжения вдоль конденсатора, % — 5; 10; 25;
 f — частота тока, Гц.

На рис. 1 показана зависимость максимальной длины конденсаторной пластины при подключении ВЧ-генератора к середине конденсаторной пластины. В средневолновом диапазоне частот стоячие волны не оказывают заметного влияния, но в высокочастотном диапазоне длину конденсатора и длину волны необходимо увязать. Это касается частот выше $4 \cdot 10^6$ Гц. Чтобы уменьшить неравномерность напряженности электромагнитного поля вдоль конденсатора, высокочастотный генератор подключают в нескольких определенных точках к конденсатору (первый способ).

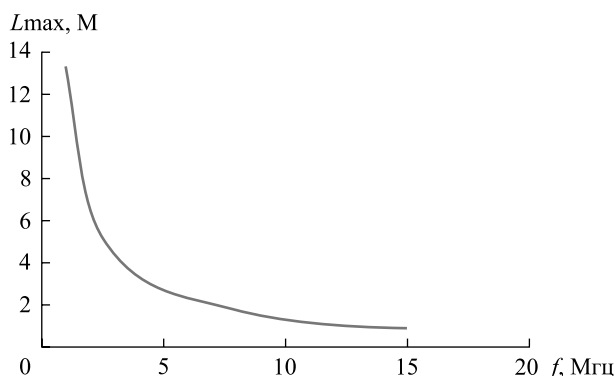


Рис. 1. Зависимость максимальной длины конденсаторной пластины от частоты тока при неравномерности распределения напряженности поля вдоль конденсатора не выше 10 %

Fig. 1. Dependence of the maximum length of the capacitor plate, for, the non-uniformity of the distribution of the field strength along the capacitor is not higher than 10 %, on the frequency of the current

Второй способ уменьшения неравномерности нагрева пиломатериалов основан на подключении регулируемых индуктивностей, которые настраиваются в резонанс с нагрузкой. В качестве переменных индуктивностей могут использоваться переменные вариаторы, устанавливаемые в месте подвода высокой частоты (ВЧ) от генератора к конденсатору. По мере увеличения расстояния от точки подвода к конденсатору ВЧ напряжение изменяется, что ухудшает характеристики прогрева материала. Поэтому от количества мест подвода электромагнитной энергии к конденсатору зависит равномерность характеристик поля и качество сушки древесины. Тепловой энергии в материале выделяется тем больше, чем выше напряженность электромагнитного поля.

Частоты, разрешенные для применения в промышленности, на которых эффективно можно

сушить пиломатериалы: 1,76; 5,28 и 13,56 МГц. Хотя выделяемая в материале энергия пропорциональна частоте поля, в конструкции сушильных установок следует учитывать затухание поля на пластинах конденсатора. С учетом допустимой неравномерности в древесине температурного поля изменения характеристик электромагнитного поля вдоль конденсатора не должны превышать 10 %. Тогда для частоты 1,76 МГц максимальная длина пластин, рассчитанная по формуле (4), составляет 6,5 м. Поэтому в конденсаторе, рассчитанном по длине на один штабель, точка подвода высокой частоты может располагаться в любом месте. Для частоты 5,28 МГц максимальная длина пластины составляет 2,7 м. Для подвода энергии к конденсатору протяженностью 6 м можно использовать одну центральную точку. В месте подвода энергии следует установить переменную индуктивность либо подключить конденсатор в двух точках. При этом расстояние от точки подключения до конца электрода должно быть равно одной четверти длины пластины конденсатора, а расстояние между точками подключения — половине длины пластины конденсатора. Вариант двухточечного подключения конденсатора приведен на рис. 2.

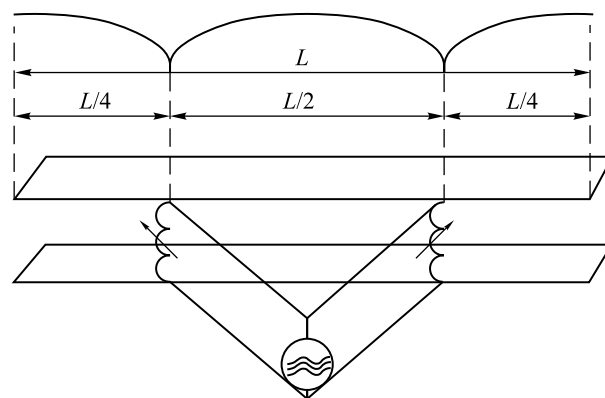


Рис. 2. Подключение ВЧ – генератора к рабочему конденсатору длиной 6 м в двух точках [1]

Fig. 2. Connecting the RF generator to a working capacitor 6 m long at two points [1]

При использовании частоты 13,56 МГц, а именно такова частота ВЧ-генераторов, выпускаемых ЛЗВУ ВНИИТВЧ (ВЧГ60/13), допустимая длина пластины конденсатора составляет всего 0,85 м. Конденсатор надо подключать в трех точках. Причем расстояние от крайних точек подключения до конца электрода должно составлять 1/6 длины электрода, а между точками подключения — 1/3 длины электрода, и в этих точках следует подключать переменные индуктивности для настройки в резонанс с нагрузкой. Трехэлектродная схема подключения конденсатора приведена на рис. 3. Центральный высокопотенциальный электрод

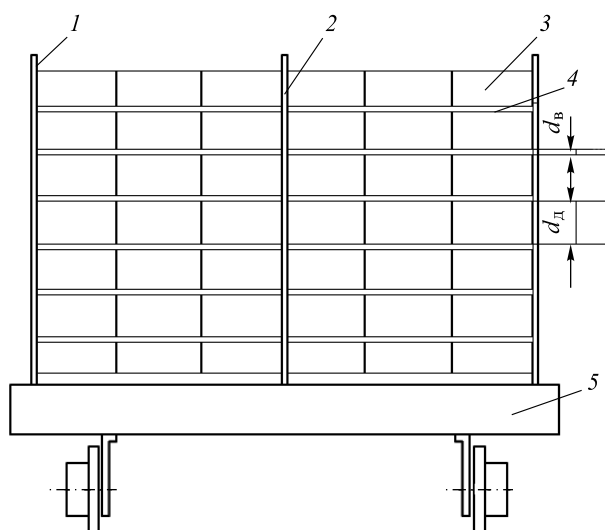


Рис. 3. Трехэлектродный рабочий конденсатор с вертикальными электродами: 1 — центральный (высокопотенциальный) электрод; 2 — боковой электрод; 3 — пиломатериалы; 4 — прокладки толщиной 2,5 см; 5 — тележка

Fig. 3. Three-electrode working capacitor with vertical electrodes: 1 — central (high-potential) electrode; 2 — lateral electrode; 3 — sawn timber; 4 — gaskets thickness 2,5 cm; 5 — trolley

крепится на тележке, пиломатериалы по ширине штабеля укладывают к центральному высокопотенциальному электроду на прокладках толщиной 2,5 см. Этот метод особенно рационален для реализации вакуумно-высокочастотной сушки, когда материал находится в автоклаве. Серийные промышленные автоклавы имеют диаметр от 2,5 до 3,6 м, они хорошо подходят для вакуумно-высокочастотной сушки. Трехэлектродная система конденсатора позволяет иметь максимальный объем загружаемого материала. Электрическая емкость рабочего конденсатора определяется по формуле

$$C_p = \frac{(n-1)(\epsilon'_B S_B + \epsilon'_D S_D) \epsilon'_B S}{4\pi(d_D \epsilon'_B S + d_B \epsilon'_B S_B + \epsilon'_D S_D d_B)}, \quad (5)$$

где n — число электродных пластин;

ϵ'_B — диэлектрическая проницаемость воздуха;

ϵ'_D — диэлектрическая проницаемость высушиваемой древесины;

S — общая односторонняя площадь электродной пластины;

S_B — площадь пластины, занятая горизонтальными воздушными промежутками между пиломатериалами, см²;

S_D — площадь пластины электрода, занятая высушиваемыми пиломатериалами, см²;

d_B — сумма всех воздушных промежутков по высоте штабеля, см;

d_D — сумма толщин всех пиломатериалов по высоте штабеля, см.

Для автоклава стандартных размеров, используемого в качестве ограждений сушильной установки, в конденсатор загружают два штабеля шириной 60 см и высотой 120 см. Обрезные доски укладывают на прокладках толщиной 2,5 см без шпаций. Ширина и толщина досок на емкость конденсатора практически не влияют. Расчеты показывают, что емкость конденсатора C_p при влажности 60 % составляет около 1500 пФ и снижается до 500 пФ при влажности досок 15 %.

Входное сопротивление определяется выражением

$$X_{вх} = \omega L' = \frac{1}{\omega C_p} + \omega L_{ш}, \quad (6)$$

где $\omega L'$ — индуктивное сопротивление фидера, 1 мкГн;

$L_{ш}$ — индуктивность заземляющих шин, 0,1 мкГн.

В зависимости от влажности материала входное сопротивление составляет от 85 до 70 Ом.

В конце сушки следует снижать напряжение, чтобы реактивный ток не превышал 250 А.

Выводы

При высокочастотной сушке пиломатериалов допустимая неравномерность напряженности электромагнитного поля не должна превышать 10 %. Напряженность электромагнитного поля убывает по мере удаления пластины конденсатора от вводного фидера. Затухание высокочастотной энергии увеличивается с увеличением частоты тока.

Для промышленных частот расстояния между присоединительными электродами фидера не должны превышать: для частоты 1,76 МГц — 6,5 м; 5,28 МГц — 2,7 м; для частоты 13,56 Гц — 0,85 м. В установках с генератором тока частотой 13,56 Гц следует применять трехпластинчатый конденсатор, подключаемый в трех точках. При этом в качестве ограждений сушильной установки можно использовать автоклав.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 37.8809.2017/БЧ.

Список литературы

- [1] Вайсфельд Э.Г., Горяев А.А. О равномерности нагрева пиломатериалов при диэлектрической сушке древесины // Науч. тр. ЦНИИМОД. Сушка и защита древесины. М.: ЦНИИМОД, 1985. С. 88–98.
- [2] Галкин В.П. Влияние растягивающих напряжений на изменение величины усушки // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2016. Т. 20. № 4. С. 4–9.
- [3] Санаев В.Г. Изменение усушки древесины при развитии сушильных напряжений // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2015. Т. 19. № 1. С. 54–58.

- [4] Уголев Б.Н. Исследование деформационных превращений поперек волокон древесины кольцесосудистых пород // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-техн. конф. Кострома: КГТУ, 2015. С. 32–34.
- [5] Уголев Б.Н. Экспериментальные исследования влияния наноструктурных изменений древесины на ее деформативность // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2012. № 7 (90). С. 124–126.
- [6] Галкин В.П., Калинина А.А., Санаев В.Г. Оценка влияния сушильных напряжений на изменение коэффициента усушки // Современные проблемы биологического и технического лесоведения: сб. тр. I Междунар. науч.-практ. конф. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. С. 54–59.
- [7] Калинина А.А., Галкин В.П., Санаев В.Г. Влияние внутренних напряжений на изменение коэффициента усушки // Современные проблемы биологического и технического лесоведения: сб. тр. I Междунар. науч.-практ. конф. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. С. 50–54.
- [8] Галкин В.П. Древесиноведческие аспекты инновационной технологии сушки древесины. М.: МГУЛ, 2010.
- [9] Дьяконов К.Ф., Горяев А.А. Сушка древесины токами высокой частоты. М.: Лесная пром-сть, 1981. 168 с.
- [10] Горяев А.А. Вакуумно-диэлектрические сушильные камеры. М.: Лесная пром-сть, 1985. 104 с.

Сведения об авторах

Галкин Владимир Павлович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры лесоведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), vgalkin@mgul.ac.ru

Горяев Аркадий Алексеевич — канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», ark16111936@gmail.com

Баланцева Наталья Борисовна — канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», ark16111936@gmail.com

Калиничева Оксана Александровна — канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», ark16111936@gmail.com

Калинина Алёна Анатольевна — ведущий инженер кафедры лесоведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kalinina@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 17.07.2017 г.

FEATURES HIGH-FREQUENCY DRYING LUMBER

V.P. Galkin¹, A.A. Goriaev², N.B. Balantseva², O.A. Kalinicheva², A.A. Kalinina¹

¹ BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

² Northern (Arctic) Federal University, Severnaya Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, Russia; 163002

vgalkin@mgul.ac.ru

Considered the process of balancing the electromagnetic field along the capacitor with long-length lumber drying during high frequency. Different ways of reducing the uneven of heating of lumber in a different region of the electromagnetic field frequency are given. It is shown that in the medium frequency range standing waves do not exert significant influence on the distribution of the field along the capacitor. In the high-frequency range of 5...15 MHz condenser length and the current frequency should be linked. Is offered two ways. The first — the connection HF-generator in two-three points along the length of the capacitor. Second — connect adjustable inductances at the points of connection HF-generator. To reduce the non-uniformity heating of stacks over the cross section is considered three electrode capacitor.

Keywords: high-frequency drying, the uneven heating, current frequency, capacitor, standing waves, voltage antinodes

Suggested citation: Galkin V.P., Goryaev A.A., Balantseva N.B., Kalinicheva O.A., Kalinina A.A. *Osobennosti vysokochastotnoy sushki pilomaterialov* [Features high-frequency drying lumber]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 73–77. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-73-77

References

- [1] Vaysfeld E.G., Goriaev A.A. *O ravnomernosti nagreva pilomaterialov pri dielektricheskoy sushke drevesiny* [About uniformity of heating of lumber during a dielectric drying wood]. *Nauchnye trudy TSNIMOD. Sushka i zashchita drevesiny* [Scientific work TSNIMOD. Drying and wood protection]. Moscow: TSNIMOD, 1985, pp. 88–98.
- [2] Galkin V.P., Sanaev V.G., Ugolev B.N., Kalinina A.A. *Vliyanie rastyagivayushchikh napryazheniy na izmenenie velichiny usushki* [The influence of tensile stresses on the change in shrinkage value] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2016, v. 20, no. 4, pp. 4–9.
- [3] Sanaev V.G., Ugolev B.N., Galkin V.P., Kalinina A.A., Aksenov P.A. *Izmenenie usushki drevesiny pri razvitiy sushil'nykh napryazheniy* [Change of wood shrinkage at the development of drying stresses] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2015, v. 19, no. 1, pp. 54–58.
- [4] Ugolev B.N., Gorbacheva G.A., Kalinina A.A., Smirnov D.V. *Issledovanie deformatsionnykh prevrashcheniy poperek volokon drevesiny kol'tsesosudistykh porod* [Investigation of deformation transformations across the fibers of the wood of the annular-vessel timber] *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa sbornik nauchnykh trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. KSTU* [Actual problems and prospects for the development of the timber industry complex: a collection of scientific papers of the III International Scientific and Technical Conference. Kostroma: KSTU publ., 2015, pp. 32–34.
- [5] Ugolev B.N., Galkin V.P., Gorbacheva G.A., Kalinina A.A., Belkovskiy S.Yu. *Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya nanostrukturnykh izmeneniy drevesiny na ee deformativnost'* [Experimental studies of the influence of nanostructure changes of wood on its deformability] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2012, no. 7 (90), pp. 124–126.
- [6] Galkin V.P., Kalinina A.A., Sanaev V.G. *Otsenka vliyaniya sushil'nykh napryazheniy na izmenenie koeffitsienta usushki* [Evaluation of the effect of drying stresses on the change of shrinkage coefficient] *Sovremennye problemy biologicheskogo i tekhnicheskogo drevesinovedeniya. Sbornik trudov I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern Problems of Biological and Technical Wood Science: Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference]. Yoshkar-Ola: PGU publ., 2016, pp. 54–59.
- [7] Kalinina A.A., Galkin V.P., Sanaev V.G. *Vliyanie vnutrennikh napryazheniy na izmenenie koeffitsienta usushki* [The effect of drying stresses on the change of shrinkage coefficient] *Sovremennye problemy biologicheskogo i tekhnicheskogo drevesinovedeniya. Sbornik trudov I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern Problems of Biological and Technical Wood Science: Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference]. Yoshkar-Ola: PGU publ., 2016, pp. 50–54.
- [8] Galkin V.P. *Drevesinovedcheskie aspekty innovatsionnoy tekhnologii sushki drevesiny* [Timber aspects of innovative technology of wood drying] Moscow: MSFU publ., 2010.
- [9] Goriaev A.A., Deacons K.F. *Sushka drevesiny tokami vysokoy chastoty* [Drying of wood by high frequency currents]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' publ. [Timber industry], 1981, p. 168.
- [10] Goriaev A.A. *Vakuumno-dielektricheskie sushil'nye kamery* [Vacuum-dielectric drying chambers]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' publ. [Forest Industry] 1985, 104 p.

Author's information

Galkin Vladimir Pavlovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of Department of Wood Science and Technology, BMSTU (Mytishchi branch), vgalkin@mgul.ac.ru

Goryaev Arkadiy Alekseevich — Cand. Sci. (Tech.) Associate Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, ark16111936@gmail.com

Balantseva Natal'ya Borisovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, ark16111936@gmail.com

Kalinicheva Oksana Aleksandrovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, ark16111936@gmail.com

Kalinina Alena Anatol'evna — Leading Engineer, BMSTU (Mytishchi branch), kalinina@mgul.ac.ru

Received 17.07.2017