

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ШТАБЕЛЕ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ СУШКЕ В ВАКУУМНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

INFLUENCE OF FREQUENCY ON ELECTROMAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN A WOOD PILE WHEN DRYING IN A VACUUM-DIELECTRIC CHAMBER

Ключевые слова: напряженность электрического поля, частота ВЧ-генератора, вакуумно-диэлектрическая камера, рабочие электроды, штабель древесины, программная среда «ELCUT», электрофизические свойства древесины.

Древесина благодаря таким её свойствам, как прочность, твердость, износостойкость и хороший внешний вид нашла широкое применение в мебельном производстве, строительстве, а также для изготовления музыкальных инструментов и т.п. Технология вакуумно-диэлектрической сушки древесины – это комбинированное использование хорошо зарекомендовавшего себя в электротехнологии высокочастотного диэлектрического нагрева, в том числе и для сушки древесины в вакууме. Технологические преимущества вакуумно-диэлектрических камер (ВДК) по сравнению с традиционными способами сушки обеспечивают не только повышение скорости сушки древесины, но исключение возникновения пожаров, т.к. процесс протекает при температурах ниже 70°C. На начальном этапе исследования был проведен анализ технических характеристик высокочастотных генераторов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью. Для выбора оптимальной частоты тока была решена задача, направленная на выявление закономерностей распределения напряженности электрического поля вдоль горизонтальной и вертикальной координат по поперечному сечению штабеля высушиваемой древесины (дуб, лиственница, ель и сосна) в зависимости от частоты тока ВЧ-генератора. Исследование системы «ВДК – штабель древесины» проводилось в лицензионной программной среде «ELCUT». Установлено, что результаты исследования, представленные в относительных единицах, для штабеля, сформированного из лиственницы, ели и сосны, на 98-100% совпали с результатами, полученными для штабеля из дуба. Таким образом, для питания ВДК может быть рекомендована стандартная частота 13,56 МГц в независимости от породы высушиваемой древесины. Данное утверждение было подтверждено и результатами, полученными путем использования для расчета и выбора оптимальной частоты тока ВЧ-генератора широкоизвестных инженерных методик расчета. По итогам проведенных исследований можно сделать следующие выводы: частота 13,56 МГц является оптимальной для сушки древесины различных пород в ВДК; указанная частота обеспечивает высокую равномерность распределения

напряженности электрического и температурного полей по поперечному сечению высушиваемого штабеля и, как следствие, требуемую категорию качества сушки.

Keywords: electric field strength, RF generator frequency, vacuum dielectric chamber, working electrodes, wood pile, ELCUT software environment, wood electro-physical properties.

Due to its properties as strength, hardness, wear resistance and good appearance, wood is widely used in furniture production, construction, and in manufacture of musical instruments, etc. The technology of vacuum-dielectric drying of wood is the combined use of high-frequency dielectric heating which has proven itself in electrical technology, including for drying wood in vacuum. The technological advantages of vacuum dielectric chambers (VDC) compared to traditional drying methods provide not only an increase in the drying speed of wood, but also the elimination of fires, because the process takes place at temperatures below 70°C. At the initial stage of the study, the analysis of the technical characteristics of high-frequency generators produced by domestic and foreign industry was carried out. To select the optimal current frequency, a problem was solved aimed at identifying patterns of distribution of electric field strength along horizontal and vertical coordinates along the cross section of a pile of dried wood (oak, larch, spruce and pine) depending on the frequency of the HF generator current. The study of the VDC - wood pile system was carried out in the licensed software environment "ELCUT". It was found that the research results presented in relative units for a pile formed from larch, spruce and pine coincided by 98-100% with the results obtained for an oak pile. Thus, a standard frequency of 13.56 MHz may be recommended for powering the VDC regardless of the type of wood being dried. This statement was confirmed by the results obtained by using well-known engineering calculation methods to calculate and select the optimal frequency of the HF generator current. Based on the research findings, the following conclusions may be drawn: the frequency of 13.56 MHz is the optimal frequency for drying wood of various species in an air-conditioning chamber; the specified frequency ensures high uniformity of the distribution of electric and temperature fields across the cross-section of the pile being dried and, as a consequence, the required category of drying quality.

Качанов Александр Николаевич, д.т.н., профессор, зав. каф. электрооборудования и энергосбережения, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: kan@ostu.ru.

Гришин Владимир Александрович, студент, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: grishin29052000@yandex.

Kachanov Aleksandr Nikolaevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: kan@ostu.ru.

Grishin Vladimir Aleksandrovich, student, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: grishin29052000@yandex.

Введение

Хорошо известно, что древесина благодаря таким её свойствам, как прочность, твердость, износостойкость и хороший внешний вид нашла широкое применение в мебельном производстве, строительстве, а также для изготовления музыкальных инструментов и т.п. Технология вакуумно-диэлектрической сушки древесины – это комбинированное использование хорошо зарекомендовавшего себя в электротехнологии высокочастотного диэлектрического нагрева, в том числе и для сушки древесины в вакууме. Технологические преимущества вакуумно-диэлектрических камер (ВДК) по сравнению с традиционными способами сушки заключаются в том, что при снижении давления в рабочей камере установки вода закипает и интенсивно испаряется при температуре нагрева древесины 45-60°C, тогда как при атмосферном давлении этот процесс возможен при температуре 100°C [1, 2]. Кроме того, эффективная термическая обработка диэлектриков в электрическом поле возможна лишь при частоте поля выше 0,5 МГц, поэтому для диэлектрического нагрева применяются высокочастотные генераторы [3].

Цель и задачи исследования

Рабочая частота должна обеспечивать требуемую интенсивность нагрева, которая задается технологическим процессом, электрическую прочность в системе рабочий конденсатор-высушиваемая древесина, равномерное распределение напряжения по всей длине электродов рабочего конденсатора, возможность согласования параметров нагрузки с параметрами источника питания и работы при максимальном КПД установки [4].

Первые два требования определяют ту минимально допустимую частоту, которая обеспечивает требуемую производительность процесса нагрева при работе с напряжениями поля в материале и в воздушном зазоре, не превышающими допустимых значений [4].

Объекты и методы

На начальном этапе исследования был проведен анализ технических характеристик высокочастотных генераторов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью. В таблице 1 приведен ряд частот, входящий в диапазон от 3 до 50 МГц. Указанные частоты нашли практическое применение для изготовления ВЧ-генераторов, используемых в качестве источников питания установок диэлектрического нагрева.

Экспериментальная часть

Для выбора оптимальной частоты источника питания была поставлена и решена задача, направленная на выявление влияния указанных в таблице 1 значений частот на характер распределения напряженности электромагнитного поля по поперечному сечению штабеля высушиваемой древесины (дуб, лиственница, ель и сосна) вдоль его горизонтальной и вертикальной координат. На рисунке 1 приведена расчетно-графическая модель системы «ВДК – штабель древесины», использованная авторами для решения поставленных задач с применением лицензионной программы «ELCUT».

Наибольший практический интерес представляют результаты исследования электрофизических процессов, протекающих в нижнем и верхнем рядах штабеля, так как вследствие краевого эффекта в этих рядах наблюдаются повышенные значения напряженности электрического поля, что в свою очередь приводит к повышению температуры. Для более точного построения графиков картины распределения напряженности электрического поля (E) по вертикальным рядам высушиваемого штабеля древесины было принято решение рассчитать значение E на уровне второго ряда (рис. 1), а именно, на уровне 12-го ряда штабеля [5].

Частоты промышленного использования

Частота, МГц	3	6,78	13,56	27,12	40,68	50
Пределы изменения частоты, %	±2,5	±1,0	±2,5	±1,0	±1,0	±1,0

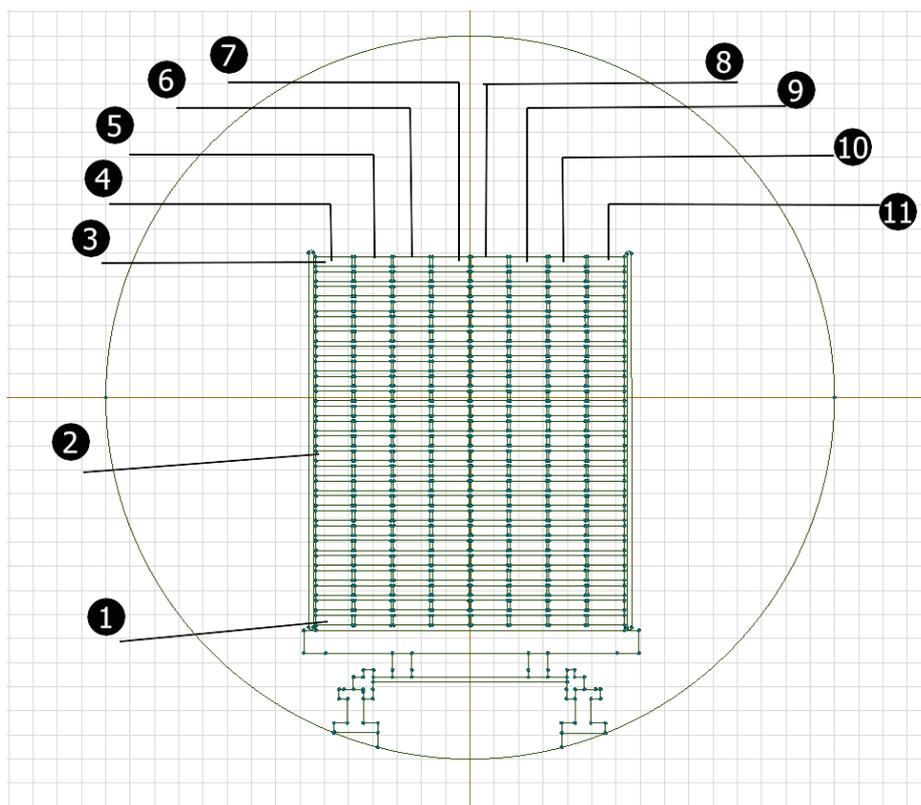


Рис. 1. Расчетно-графическая модель системы «ВДК – штабель древесины»:
 1, 2, 3 – 1-й, 12-й и 25-й горизонтальные ряды досок высушиваемого штабеля;
 4-11 – вертикальные ряды из досок высушиваемого штабеля

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам проведенных исследований для выбранных пород древесины выявлены картины распределения напряженности электрического поля по поперечному сечению штабеля древесины как функции от частоты тока источника питания, поскольку картины распределения напряженности электрического поля для исследуемых пород древесины качественно повторяют друг друга, а количественно отличны. Последнее хорошо иллюстрируется нижеприведенными графиками для высушиваемого штабеля из дуба (рис. 2-5), построенными в относительных единицах. За базовые значения напряженности электрического поля были приняты полученные значения на уровне 25-го горизонтального ряда досок штабеля для каждого из восьми вертикальных рядов. Значения, соответствующие каждому вертикальному ряду штабеля

на уровне 12-го и 1-го горизонтальных рядов, рассчитаны по следующим формулам:

$$E'_{12} = 1 - \frac{E_{25} - E_{12}}{E_{25}}, \text{ о. е.}; \quad (1)$$

$$E'_1 = 1 - \frac{E_{25} - E_1}{E_{25}}, \text{ о. е.} \quad (2)$$

Графики распределения напряженности электрического поля для исследуемых частот ВЧ-генераторов в вертикальных рядах № 8-11 штабеля из дуба являются зеркальным отражением графиков, приведенных на рисунках 2-5, что не противоречит физике процессов, протекающих в исследуемой системе «ВДК – штабель древесины» [6]. Для штабеля, сформированного из лиственницы, ели и сосны результаты исследования, представленные в относительных единицах, на 98-100% совпали с результатами, полученными для дуба.

Из анализа кривых, приведенных на графиках, следует, что оптимальной частотой является

ся частота 13,56 МГц. Данное утверждение было подтверждено результатами, полученными путем использования известных инженерных ме-

тодик для расчета частоты тока источников питания диэлектрических установок.

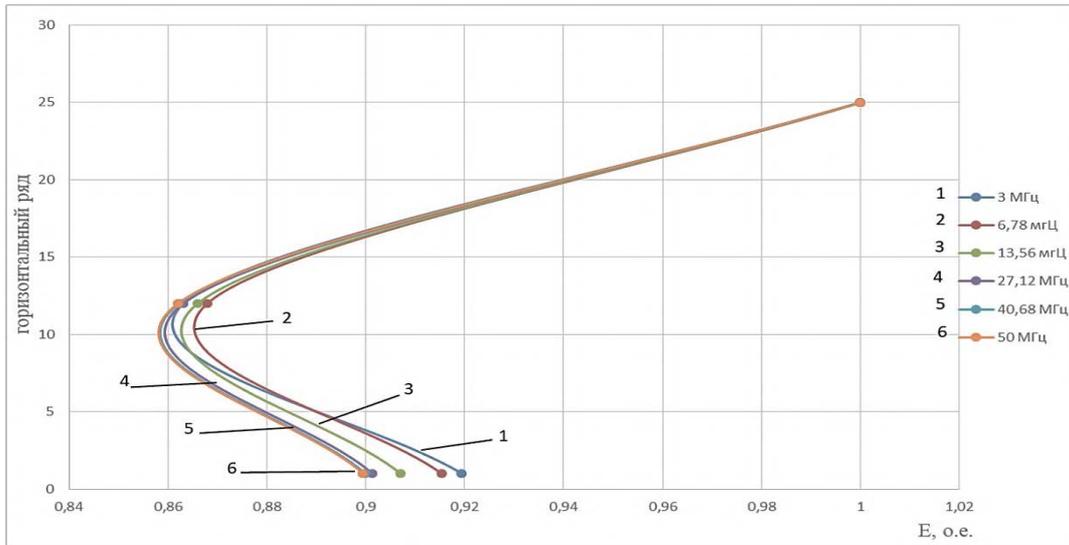


Рис. 2. График распределения E в вертикальном ряде № 4 штабеля из дуба для различных частот

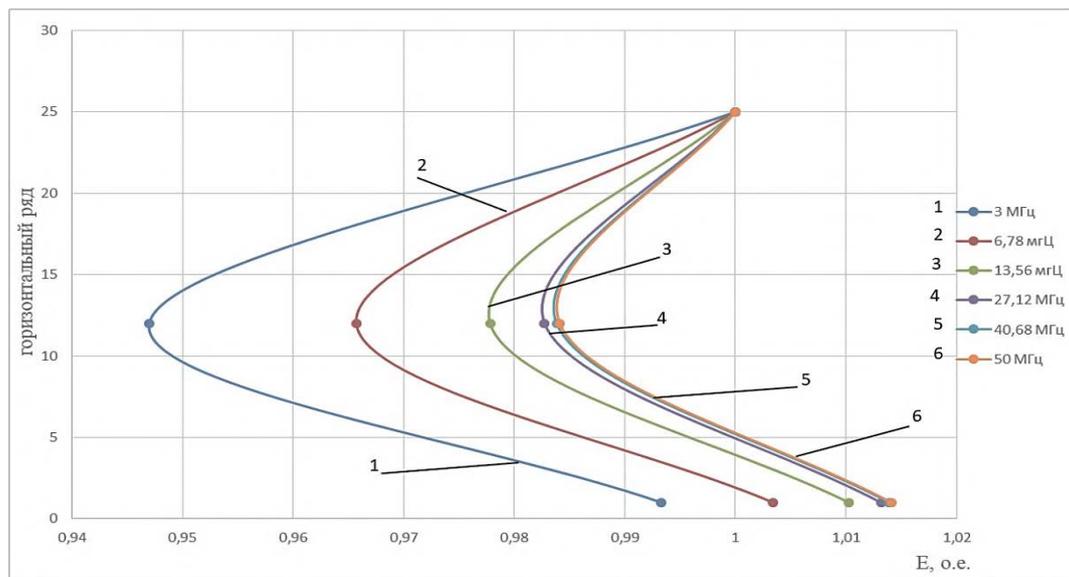


Рис. 3. График распределения E в вертикальном ряде № 5 штабеля из дуба для различных частот

В частности, при нагреве древесины, размещенной между рабочими электродами ВДК с учетом воздушного зазора, минимальная частота определяется по формуле [7]:

$$f_{min} = \frac{1,8 \cdot 10^{10} \cdot \gamma \cdot c \cdot \Delta T}{E_B \cdot \varepsilon \cdot tg\delta \cdot \Delta t \cdot \eta_t}, \text{ МГц}, \quad (3)$$

где γ – плотность материала, кг/м³;

c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С);

η_t – термический КПД процесса, учитывающий потери тепла в рабочем конденсаторе, ориентировочные значения 0,80-0,90 [7];

ΔT – изменение температуры (47°С);

Δt – время работы ВЧ генератора (12·60·60 = 43200 с).

Для дуба минимальная частота нагрева составит:

$$f_{min} = \frac{1,8 \cdot 10^{10} \cdot 500 \cdot 2500 \cdot 47}{10^6 \cdot 9 \cdot 0,3 \cdot 43200 \cdot 0,8} = 11,33 \text{ МГц.}$$

Минимальная частота нагрева лиственницы:

$$f_{min} = \frac{1,8 \cdot 10^{10} \cdot 490 \cdot 2500 \cdot 47}{10^6 \cdot 8 \cdot 0,29 \cdot 43200 \cdot 0,8} = 12,92 \text{ МГц.}$$

Для сосны минимальная частота нагрева:

$$f_{min} = \frac{1,8 \cdot 10^{10} \cdot 450 \cdot 2500 \cdot 47}{10^6 \cdot 10 \cdot 0,3 \cdot 43200 \cdot 0,8} = 9,1 \text{ МГц.}$$

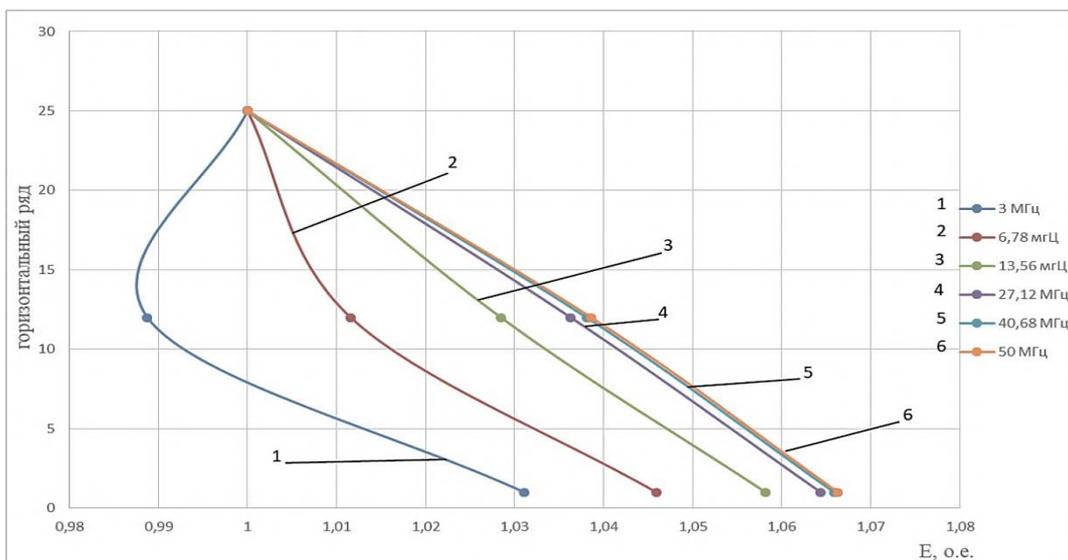


Рис. 4. График распределения E в вертикальном ряде № 6 штабеля из дуба для различных частот

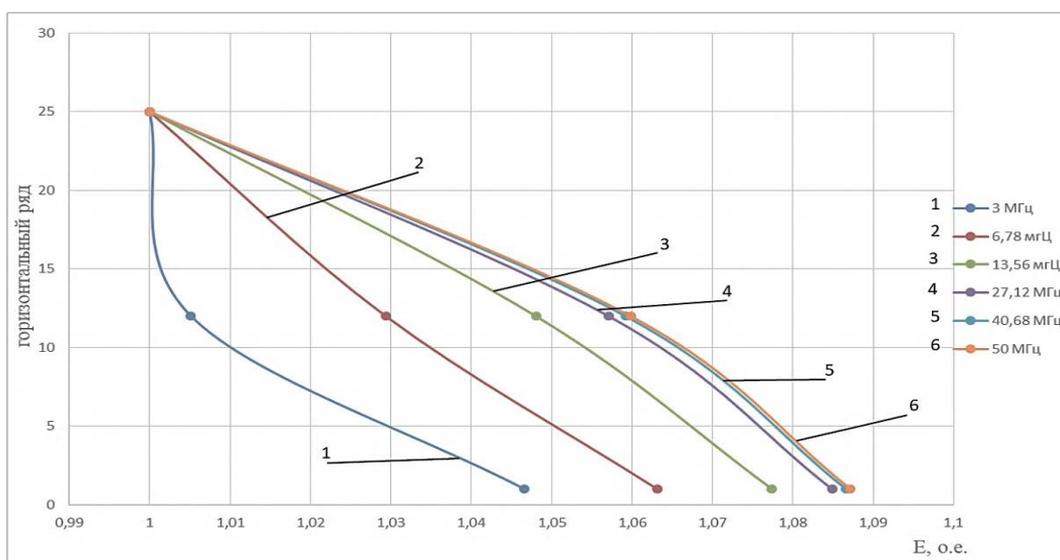


Рис. 5. График распределения E в вертикальном ряде № 7 штабеля из дуба для различных частот

Минимальная частота нагрева ели:

$$f_{min} = \frac{1,8 \cdot 10^{10} \cdot 490 \cdot 2390 \cdot 47}{10^6 \cdot 12,1 \cdot 0,25 \cdot 43200 \cdot 0,8} = 9,48 \text{ МГц.}$$

Результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Зависимость частоты нагрева от породы древесины

Порода	Дуб	Лиственница	Сосна	Ель
Частота, МГц	11,33	12,92	9,1	9,48

При выборе частоты следует помнить, что в соответствии с принятыми нормами радиопомех для промышленных высокочастотных установок выделен ряд частот, которые можно использовать для нагрева диэлектриков в электрическом поле.

Также в процессе компьютерного моделирования было установлено, что с ростом значения

частот источника питания возрастает не только неравномерность распределения напряженности электрического поля (табл. 3), но и неравномерность нагрева древесины [4, 8].

Заключение

На основании проведенных исследований было установлено, что в качестве оптимальной частоты для использования в установках для вакуумно-диэлектрической сушки различных пород древесины может быть рекомендована стандартная частота 13,56 МГц. Данная частота обеспечивает равномерное распределение напряженности электрического поля по поперечному сечению высушиваемого штабеля древесины и, как следствие, требуемую категорию качества сушки древесины.

**Расхождение напряженности (E , о.е./ E В/м) по рядам штабеля
в зависимости от частоты источника питания**

Частота ВЧ-генератора, МГц	Вертикальный ряд			
	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
3	0,1369/379,5	0,0530/134,2	0,0423/102,8	0,0466/111,52
6,78	0,1320/586,2	0,0377/150,7	0,0459/175,5	0,0631/237,2
13,56	0,1339/708,3	0,0325/152,2	0,0582/259,8	0,0774/339,2
27,12	0,1369/766,9	0,0304/149,9	0,0644/301,1	0,0849/389,2
40,68	0,1377/780,7	0,0301/149,6	0,0659/310,9	0,0866/400,7
50	0,1379/784,7	0,0299/149,5	0,0663/313,8	0,0872/404,2

Библиографический список

1. Справочник по сушке древесины / Е. С. Богданов, В. А. Козлов, В. Б. Кунтыш, В. И. Мелехов; под редакцией Е. С. Богданова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Лесн. пром-сть, 1990. – 304 с. – Текст: непосредственный.
2. Лебедев, П. Д. Расчёт и проектирование сушильных установок: учебник для высших учебных заведений / П. Д. Лебедев. – Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. – 320 с. – Текст: непосредственный.
3. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А. В. Нетушил, Б. Я. Жуховицкий, В. Н. Кудин, Е. П. Парини. – Москва: Го-энергоиздат, 1958. – 481 с. – Текст: непосредственный.
4. Княжевская, Г. С. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Г. С. Княжевская, М. Г. Фирсова, Р. Ш. Килькеев; под редакцией А. Н. Шамова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1989. – 64 с. – Текст: непосредственный.
5. Качанов, А. Н. Исследование электрического и теплового полей при сушке древесины в вакуумно-диэлектрической камере / А. Н. Качанов, В. А. Гришин. – Текст: непосредственный // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* / ОГУ им. И. С. Тургенева. – 2023. – № 5 (357). – С. 72-78.
6. Chen, Z. 1997. Primary driving force in wood vacuum drying. Ph.D. dissertation, Virginia Tech., Blacksburg, VA. <http://nscholar.lib.vt.edu/theses/available/ed-02198-1-855381>.
7. Электротехнология / В. А. Карасенко, Е. М. Заяц, А. Н. Баран, В. С. Корко. – Москва: Колос, 1992. – 304 с. – Текст: непосредственный.
8. Дьяконов, К. Ф. Сушка древесины токами высокой частоты / К. Ф. Дьяконов, А. А. Горяев. – Москва: Лесная промышленность, 1981. – 168 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Bogdanov, E. S. Spravochnik po sushke drevesiny / E.S. Bogdanov, V.A. Kozlov, V.B. Kuntysch, V.I. Melekhov; pod redaktsiei E.S. Bogdanova. – 4-e izd., pererab. i dop. – Moskva: Lesn. prom-st, 1990. – 304 s.
2. Lebedev, P.D. Raschet i proektirovanie sushilnykh ustanovok: ucheb. dlia vyssh. ucheb. zavedenii / P.D. Lebedev. – Moskva; Leningrad: Gosenergoizdat, 1962. – 320 s.
3. Netushil, A.V. Vysokochastotnyi nagrev dielektrikov i poluprovodnikov / A.V. Netushil, B.Ia. Zhukhovitskii, V.N. Kudin, E.P. Parini. – Moskva: Goenergoizdat, 1958. – 481 s.
4. Kniazhevskaja, G.S. Vysokochastotnyi nagrev dielektricheskikh materialov / G.S. Kniazhevskaja, M.G. Firsova, R.Sh. Kilkeev; pod red. A.N. Shamova. – 2-e izd., pererab. i dop. – Leningrad: Mashinostroenie. Leningr. otdelenie, 1989. – 64 s.
5. Kachanov, A.N. Issledovanie elektricheskogo i teplovogo polei pri sushke drevesiny v vakuumno-dielektricheskoi kamere / A.N. Kachanov, V.A. Grishin // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2023. – No. 5 (357). – S. 72-78.
6. Chen, Z. 1997. Primary driving force in wood vacuum drying. Ph.D. dissertation, Virginia Tech., Blacksburg, VA. <http://nscholar.lib.vt.edu/theses/available/ed-02198-1-855381>.
7. Elektrotekhnologija / V.A. Karasenko, E.M. Zaiats, A.N. Baran, V.S. Koroko. – Moskva: Kolos, 1992. – 304 s.
8. Diakonov, K.F. Sushka drevesiny tokami vysokoi chastoty / K.F. Diakonov, A.A. Gorjaev. – Moskva: Lesnaia promyshlennost, 1981. – 168 s.