

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ

А. Н. Качанов, Д. А. Коренков

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Работа направлена на дальнейшее совершенствование ВЧ сушильных установок за счет повышения равномерности процесса сушки. Исследовано влияние размеров шпаций и воздушных зазоров между вертикальными электродами и штабелем на равномерность электромагнитного поля в древесине. Определено, что электромагнитный процесс в поперечном сечении штабеля можно рассматривать как квазистационарный. Приведена математическая модель, описывающая распределение электромагнитного поля в рабочей камере высокочастотной установки. Проведены вычисления в программных комплексах «Elcut» и «Mathcad». Обработка результатов исследования выполнена с применением методов теории планирования эксперимента и статистического анализа. Установлена зависимость коэффициента неоднородности электрического поля в древесине от геометрических параметров штабеля.

Введение

Принцип высокочастотной (ВЧ) сушки основан на явлении диэлектрического нагрева, при котором за счет поляризации и релаксации заряженных частиц их кинетическая энергия преобразуется в тепловую во всем объеме материала пропорционально частоте и квадрату напряженности электрического поля [1]. При этом градиент температуры направлен к его центру, а термоградиентный поток влаги не препятствует её перемещению под действием других механизмов теплопереноса (диффузия, фильтрация). В итоге скорость процесса в десятки раз оказывается выше, чем при традиционных способах сушки: конвективном, кондуктивном и радиационном [2, 3].

Основной областью применения ВЧ сушки была и остается деревообработка. ВЧ установки для сушки древесины стали использоваться с середины прошлого века, но до настоящего времени не получили такого широкого распространения, как конвективные камеры. Последние эффективны для пиломатериалов из мягких лиственных и хвойных пород средней толщины. Конвективная сушка таких пиломатериалов обеспечивает хорошее качество конечного продукта. В тоже время, комбинированная высокочастотная вакуумная сушка позволяет достигнуть ещё более высокого качества, но её экономически целесообразно применять для пиломатериалов большой толщины, трудносохнущих и ценных пород древесины. В этом случае существует большой риск растрескивания и получения других дефектов из-за того, что в центральных зонах кипения влаги не происходит, и она движется к границе фазового превращения за счет градиента температуры. Непрерывный подвод высокочастотной энергии при таком механизме процесса приводит к большим перепадам влажности и механическим напряжениям, которые и являются причиной снижения качества [4]. Исследования, направленные на получение оптимальных режимов ВЧ сушки толстых пиломатериалов, продолжают проводиться, например, предложены импульсные режимы [5].

Другая причина возникновения больших механических напряжений заключается в неоднородном распределении электромагнитного поля в штабеле. Большая неоднородность возникает при сушке длинных материалов вследствие волновых явлений, при которых по длине штабеля образуются узлы и пучности напряженности электрического поля. В узлах материал не нагревается, убыль влаги отсутствует [6, 7]. Наоборот, сюда влага может перемещаться из соседних зон, где происходит интенсивное парообразование, ещё больше увеличивая перепад влажности. Немногочисленные технические решения [8, 9] направлены на устранение данной проблемы и требуют усложнения конструкции установки.

Неоднородность поля также возникает и в поперечном сечении штабеля из-за его неплотной укладки, но исследование этого явления путем непосредственного измерения параметров электромагнитного поля затруднительно. Проведенный анализ литературных источников не выявил сведений о таких экспериментах. Однако такое исследование может быть выполнено на основе математического и компьютерного моделирования с использованием эффективных вычислительных алгоритмов и современных программных комплексов.

Таким образом, цель работы заключается в выявлении факторов и проведении комплекса исследований по изучению их влияния на распределение электромагнитного поля в поперечном сечении штабеля методами математического и компьютерного моделирования.

Теория вопроса

Главной и наиболее трудоемкой операцией в технологическом процессе сушки является укладка штабеля. Правильностью её выполнения во многом определяется качество высушенного пиломатериала. Существуют два основных способа укладки. По первому способу ряды досок укладываются между горизонтальными электродами (рис. 1, а), причем с увеличением толщины досок количество рядов между двумя соседними электродами уменьшается. Electroдами служат металлические пластины. В рядах между досками оставляются воздушные промежутки – шпации. Все нечетные электроды – низкопотенциальные и подключаются к заземленному выходу ВЧ генератора, а все четные – высокопотенциальные и подключаются к незаземленному выходу. Для предотвращения искрения принимаются специальные меры по обеспечению плотного прилегания пиломатериала к электродам в виде стяжек или грузов. Каждый слой можно представить схемой замещения (рис. 1, б), состоящей из параллельно соединенных конденсаторов, заполненных древесиной и воздухом. Напряженность электрического поля в таких конденсаторах одинакова и зависит только от расстояния между электродами. Данный способ укладки характерен тем, что скорость сушки оказывается пропорциональной коэффициенту диэлектрических потерь, что должно способствовать выравниванию конечной влажности. Но на практике этого не наблюдается, поскольку шпации не обеспечивают требуемой воздухопроницаемости штабеля, в результате чего испаренная влага конденсируется внутри него. Для повышения воздухопроницаемости ряды досок между соседними электродами укладывают через прокладки (рис. 1, в). Это равносильно последовательному присоединению конденсатора к схеме на рис. 1, б. В получаемой при этом последовательно-параллельной схеме (рис. 1, г) напряженность электрического поля перераспределяется более сложным образом так, что возможен перегрев более сухих зон, особенно прокладок.

Этим же недостатком обладает второй способ – укладка с вертикальными электродами (рис. 2). С целью устранения искрения между электродами и штабелем оставляют воздушные зазоры, которые ещё больше изменяют конфигурацию электромагнитного поля в загрузке. Однако, вертикальные электроды в виде сеток, натянутых на трубчатый каркас, не препятствуют отведению испаренной влаги, обеспечивают простоту конструкции ВЧ установок, удобство их промышленного использования, сокращение трудозатрат на погрузочно-разгрузочные работы. Поэтому в работе проанализирована схема, приведенная на рис. 2.

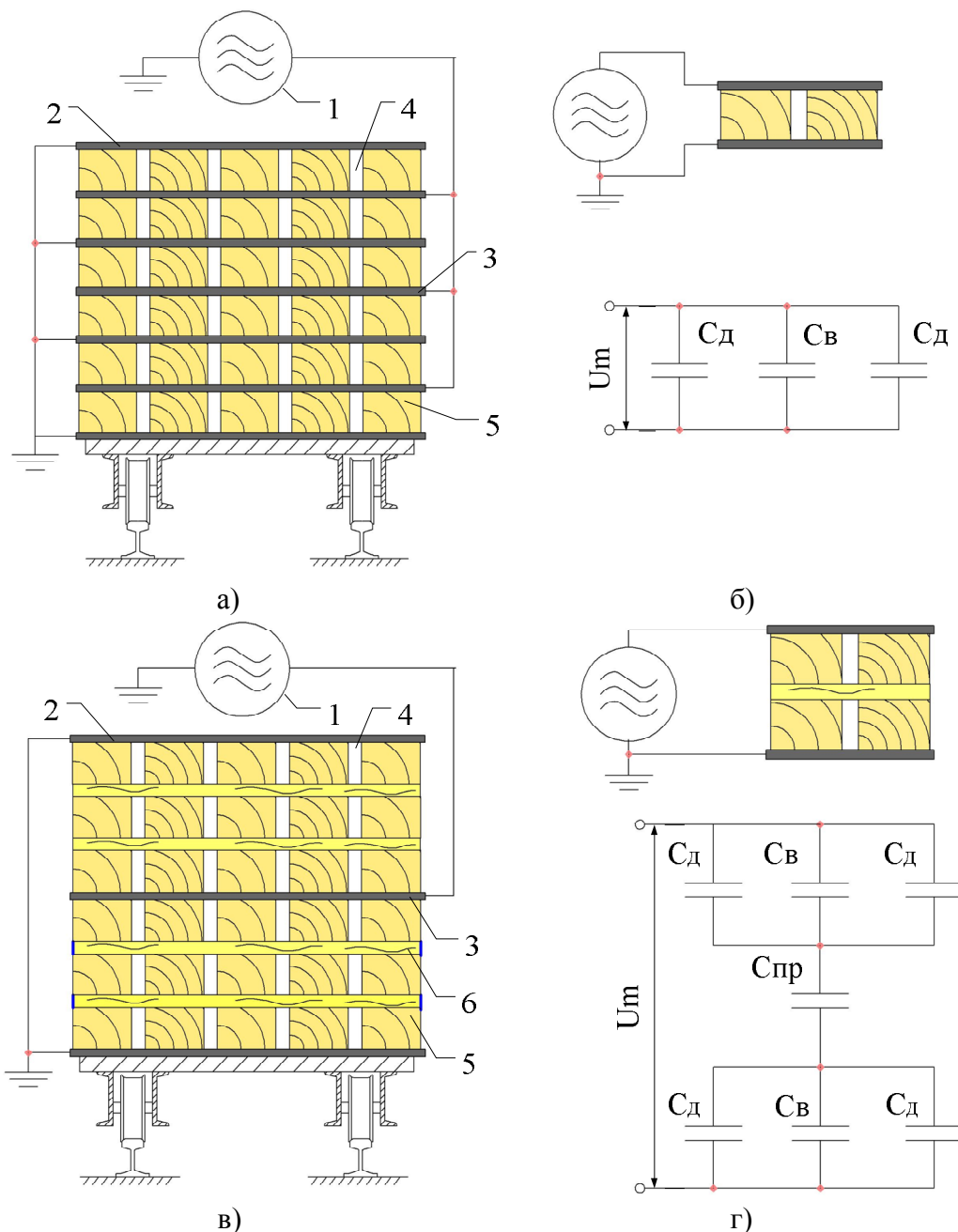


Рис. 1. Укладка штабелей с горизонтальными электродами

1 – ВЧ генератор; 2 – низкопотенциальный электрод; 3 – высокопотенциальный электрод; 4 – шпация; 5 – доска; 6 – прокладка; C_d – ёмкость конденсатора, заполненного древесиной; C_b – ёмкость конденсатора, заполненного воздухом; $C_{пр}$ – ёмкость конденсатора, заполненного материалом прокладки

Fig. 1. The piling operation with horizontal electrodes

1 – HF generator; 2 – low potential electrode; 3 – highly potential electrode; 4 – a space; 5 – a board; 6 – a piling strip; C_d – capacitor with wood; C_b – air capacitor; $C_{пр}$ – capacitor with material of a piling strip

Из выше рассмотренного следует, что основными факторами, оказывающими влияние на распределение поля в поперечном сечении штабеля являются ширина шпаций w , величина воздушного зазора d между электродами и штабелем, а также высота прокладок h . Рекомендованное значение последней составляет 25 мм [10], поэтому воздействие высоты прокладок в работе не учитывается. В качестве параметра, характеризующего распределение электромагнитного поля в высушиваемой древесине может служить коэффициент неоднородности:

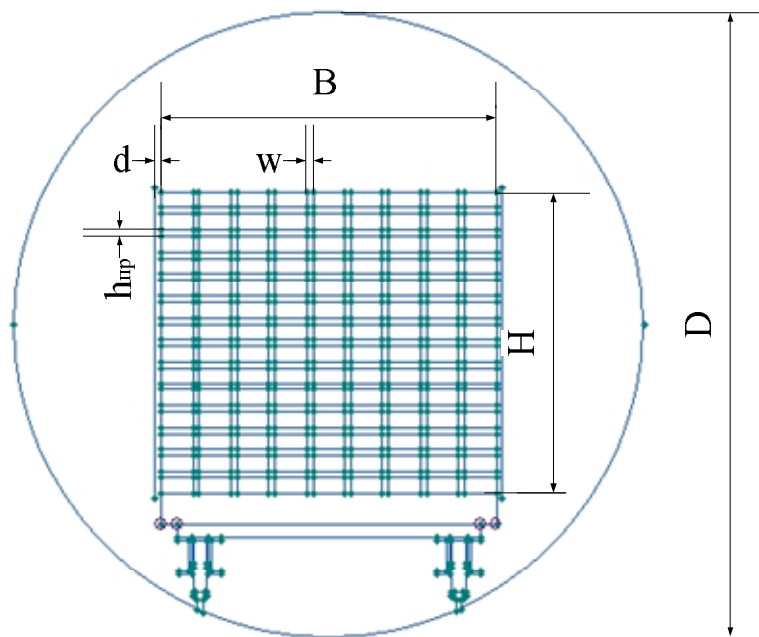


Рис. 2. Геометрическая модель объекта исследования в среде Elcut
 D – диаметр камеры; H и B – высота и ширина штабеля; w – ширина шпаций;
 d – воздушный зазор; h_{пр} – высота прокладки
 Fig. 2. geometrical model of an object of research
 D – chamber diameter; H и B – height and width of a stack; w – width of a space;
 d – size of air gaps; h_{пр} – height of a piling strip

$$k = E_{\max} / E_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где E_{\max} и $E_{\text{ср}}$ – максимальное и среднее действующие значения напряженности электрического поля в древесине, кВ/м.

Чтобы получить зависимость $k = f(d, w)$ необходимо решить несколько задач. Во-первых, составим математическую модель исследуемого электромагнитного процесса. Воспользуемся неполной системой уравнений Максвелла при условии отсутствия сторонних зарядов и токов [11]:

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}; \quad (2)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

где \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля, А/м; \vec{J} – плотность тока проводимости, А/м²; вектор магнитной индукции Вб/м²; t – время, с.

Вектор электрического смещения \vec{D} , Кл/м², связан с вектором напряженности электрического поля \vec{E} , В/м, следующим соотношением:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}. \quad (4)$$

Влажная древесина является неидеальным диэлектриком и обладает существенным коэффициентом диэлектрических потерь ($\text{tg} \delta \approx 1$). В таких средах необходимо учитывать токи проводимости, которые влияют на распределение электрического поля:

$$\bar{J} = \sigma \bar{E}, \quad (5)$$

где σ – электропроводность материала, См/м, может быть найдена по его диэлектрической проницаемости ε и коэффициенту диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$:

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon \varepsilon_0 \text{tg}\delta, \quad (6)$$

где f – частота, Гц; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Подставим (4) и (5) в (2) и применим оператор дивергенции:

$$\text{div}(\text{rot } \bar{H}) = \text{div}\left(\sigma \bar{E} + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}\right).$$

Так как дивергенция ротора равна нулю, то:

$$\text{div}\left(\sigma \bar{E} + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}\right) = 0. \quad (7)$$

Далее примем допущение, что напряжение генератора, являющееся источником поля, изменяется по гармоническому закону. Тогда все векторные величины также будут изменяться по гармоническому закону. Используя символический метод, запишем:

$$\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{i\omega\tau}; \quad \bar{E} = \frac{\bar{E}_m}{\sqrt{2}} e^{i\omega\tau}, \quad (8)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с; U_m – амплитуда напряжения генератора, кВ; \bar{E}_m – амплитуда вектора напряженности электрического поля, кВ/м.

Подставив (8) в (7) с учетом $(e^{i\omega\tau})' = i\omega e^{i\omega\tau}$, получим:

$$\text{div}(\sigma \bar{E} + i\omega \varepsilon \bar{E}) = 0. \quad (9)$$

Упростим (9) введением комплексной проводимости среды $\dot{y} = \sigma + i\omega \varepsilon$:

$$\text{div}(\dot{y} \cdot \bar{E}) = 0. \quad (10)$$

Электромагнитное поле в поперечном сечении штабеля можно считать квазистационарным. Для обоснования этого положения построен график зависимости отношения длины волны к характерному размеру среды от высоты штабеля H , м (рис. 3). В рамках рассматриваемой задачи характерным размером среды является высота штабеля. Длина волны λ , м, находится по формулам:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta},$$

$$\beta = \text{Im}(i 2\pi f \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon (1 - i \text{tg}\delta)}),$$

где β – коэффициент фазы, рад/с; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

При построении использованы диэлектрические свойства по данным [12], [13].

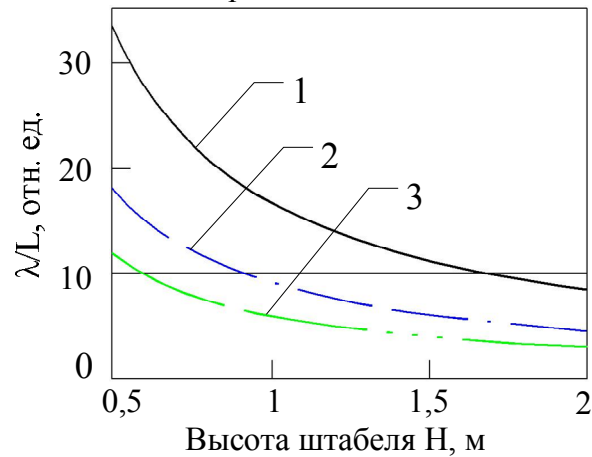


Рис. 3. Зависимость отношения λ/L от высоты штабеля при частоте 13,56 МГц и влажности древесины: 1) 0 %; 2) 30 %; 3) 60 %
 Fig. 3. Dependency of relation λ/L on stack height at frequency 13,56 MHz in case of wood moisture content a) 0,0 kg/kg; b) 0,3 kg/kg; c) 0,6 kg/kg

Из графика следует, что с ростом влажности длина волны резко уменьшается. На начальном этапе сушки (рис. 3, кривая 3) условие квазистационарности ($\lambda/L > 10$) выполняется, если высота штабеля меньше 0,6 м. В реальных условиях она может превышать это значение в 2 раза, поэтому необходимо принять ещё одно допущение, что генератор подключен к электродам посередине. Тогда характерным размером среды будет являться величина $H/2$, а условие квазистационарности будет выполняться при высоте штабеля меньше 1,2 м, что соответствует техническим характеристикам большинства существующих моделей ВЧ установок. Это означает, что переменное магнитное поле, создаваемое током электродов, не вызывает изменения электрического, и правая часть уравнения (3) приравнивается к нулю. Тогда электрическое поле обладает свойством потенциальности ($\text{rot } \vec{E} = 0$) и может быть описано градиентом скалярного электрического потенциала ϕ , В:

$$\vec{E} = -\text{grad } \phi. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (10), окончательно получаем [14]:

$$\text{div}(\dot{y} \cdot \text{grad } \phi) = 0. \quad (12)$$

На границе раздела сред 1 и 2 с разными свойствами (древесина и прокладки, древесина и воздух) используем следующие условия:

$$\vec{E}_1^\tau = \vec{E}_2^\tau, \quad (13)$$

$$\dot{y}_1 \cdot \vec{E}_1^n = \dot{y}_2 \cdot \vec{E}_2^n, \quad (14)$$

где τ и n – обозначения тангенциальной и нормальной составляющих векторов в точках, лежащих на границе раздела.

На поверхностях высокопотенциального электрода и заземленных элементах конструкции ВЧ установки, в том числе и низкопотенциального электрода, применяем граничные условия Дирихле:

$$\dot{\phi}_+ = \dot{U}; \quad (15)$$

$$\dot{\phi}_0 = 0, \quad (16)$$

где $\dot{\phi}_+$ – комплексный потенциал высокопотенциального электрода, кВ; $\dot{\phi}_0$ – комплексный потенциал заземленных элементов ВЧ установки и низкопотенциального электрода, кВ.

Система уравнений (12) - (16) полностью описывает гармонический электромагнитный процесс в поперечном сечении штабеля.

Материалы и методы исследования

Вторая задача исследования связана с численной реализацией математической модели (12) - (16). Для этого был использован пакет «Электрическое поле переменных токов» программного комплекса «Elcut». Геометрическая модель области решения представлена на рис. 2, для расчета были приняты следующие исходные данные: высота штабеля $H = 96$ см; ширина штабеля $B = 106$ см; высота прокладок $h = 2$ см; ширина прокладок $w = 2$ см; сечение досок 5×10 см²; диаметр рабочей камеры $D = 2$ м; воздушный зазор $d = 2$ см; частота генератора $f = 13,56$ МГц; амплитуда напряжения генератора $U_m = 6$ кВ. Материал досок – ель при влажности 60 %; материал прокладок и подложки – ель при влажности 0 %. Их диэлектрические проницаемости и электропроводности определены по [12], [13] с учетом формулы (6) и указаны в таблице 1.

Таблица 1. Значения диэлектрических и электрических параметров, принятых в расчетах
Table 1. Values of the dielectric and electric parameters in calculations

Элемент штабеля	Отн. диэлектрическая проницаемость		Электропроводность, См/м	
	ϵ_x	ϵ_y	σ_x	σ_y
Подложка	3,06	1,91	0	0
Прокладка	3,06	1,91	0	0
Доска	19,38	12,10	0,017	0,007

Пример расчета методом конечных элементов показан на рис. 4.

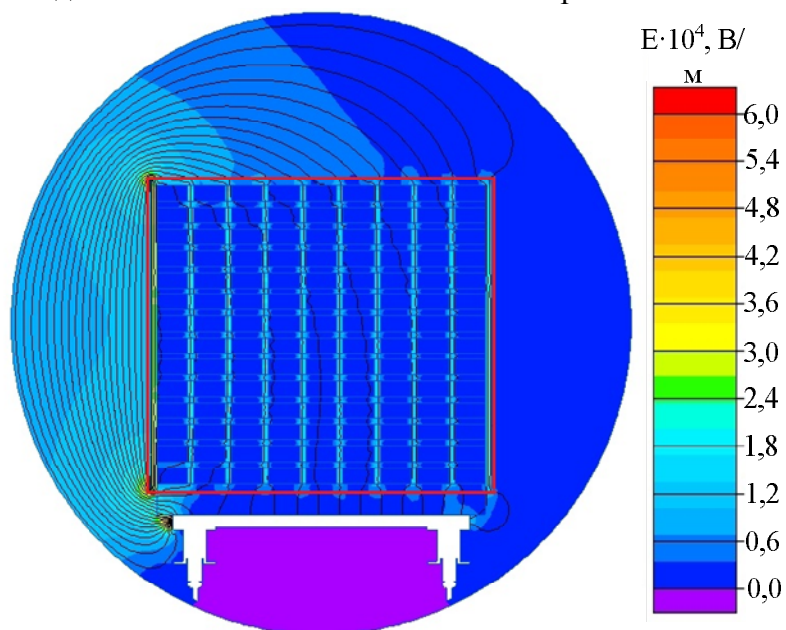


Рис. 4. Цветовая картина напряженности электрического поля
Fig. 4. Color picture of electric field strength

Из выделенной красным квадратом области (рис. 4) расчетные данные экспортировались в программу Mathcad в виде значений модуля \bar{E} в узлах прямоугольной сетки с размером ячейки $1 \times 1 \text{ см}^2$ (массив из 11765 элементов). В программе Mathcad с помощью специального алгоритма из этого массива вырезаны значения напряженности поля в подложке, воздушных зазорах, шпациях и прокладках. В итоге образован новый массив, состоящий из значений $\left| \bar{E} \right|$ только в древесине (досках), по которому вычислен коэффициент неоднородности k . В конкретном примере получено значение $k = 2,01$.

Обработка результатов

На последнем этапе исследования проведены вычисления согласно плану полного факторного эксперимента 2^2 . Уровни варьирования факторов и их кодированные значения x_i указаны в таблице 2.

Таблица 2. Уровни варьирования факторов
Table 2. The level of factor variations

Фактор		Уровень фактора					
		максимальный		минимальный		средний	
d, см	x_1	2	+1	0	-1	1	0
w, см	x_2	2	+1	0	-1	1	0

Чтобы найти коэффициенты полинома, согласно плану выполнены 4 опыта по два дубля. План эксперимента и результаты опытов приведены в таблице 3. В каждом опыте диэлектрические и электрические свойства досок и прокладок вычислялись как случайные величины, распределенные по нормальному закону. Для этого был использован генератор случайных чисел на основе центральной предельной теоремы [15]:

$$X = \sigma_x \cdot \sqrt{2} \cdot (V - 1/3) + m_x,$$

где X – искомая случайная величина; V – сумма ряда из шести случайно сгенерированных чисел с любым законом распределения; σ_x и m_x – среднеквадратическое отклонение и математическое ожидание [16] искомой случайной величины.

Математические ожидания величин ϵ_x , ϵ_y , σ_x и σ_y для досок и прокладок приняты равными значениям в таблице 1, а среднеквадратические отклонения – равными 10 % от их математических ожиданий. Остальные исходные данные перечислены выше.

Таблица 3. План и результаты опытов
Table 3. The plan and the results of the experiments

№ опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	k_1	k_2	\bar{k}
1	+1	-1	-1	+1	1,36	1,42	1,390
2	+1	+1	-1	-1	1,25	1,19	1,220
3	+1	-1	+1	-1	2,39	2,32	2,355
4	+1	+1	+1	+1	2,00	1,95	1,975
5		0	0		1,59	1,64	1,615
6		-1	0		1,92	1,87	1,895
7		+1	0		1,50	1,56	1,530
8		0	-1		1,23	1,16	1,195
9		0	+1		2,04	2,10	2,070

Обработка результатов выполнена по методике [17]. По критерию Кохрена проверена однородность дисперсий. Расчетное значение составило $G_p = 0,336$. Табличное значение $G_T = 0,91$ определено по [17] для доверительной вероятности $P = 95 \%$ и степеней свободы $n_1 = 1$ и $n_2 = 4$. Дисперсии однородны ($G_T > G_p$), поэтому коэффициенты полинома найдены по средним значениям:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{i,j} \cdot \bar{k}_i),$$

где $x_{i,j}$ – значения факторов из матрицы планирования эксперимента (выделенная область таблицы 2).

Весомость коэффициентов b_j проверена путем их сравнения с доверительным интервалом $\Delta b = 0,042$, рассчитанным по табличному [17] значению критерия Стьюдента $t = 2,78$ для $P = 95 \%$ и $n_1 = 4$. Все коэффициенты оказались весомыми, поэтому искомая зависимость имеет вид:

$$k = 1,735 - 0,138x_1 + 0,43x_2 - 0,052x_1x_2. \quad (17)$$

Для проверки правильности выбора полинома проведен опыт в нулевой точке (таблица 2, строка 5), согласно которому $\bar{k} = 1,615$, в то время как подстановка $x_1 = x_2 = 0$ в (17) дает значение $k = 1,735$. Это означает, что полином первой степени неверно аппроксимирует исходные данные из-за наличия нелинейного характера зависимости k от факторов x_1 и x_2 . Чтобы учесть нелинейность, произведена замена факторов [18]:

$$\xi_1 = d^{\alpha_1}; \quad \xi_2 = w^{\alpha_2}. \quad (18)$$

Показатели степени α_1 и α_2 являются корнями уравнений:

$$c_{1(2)} = \frac{2^{1-\alpha_{1(2)}} (a_{1(2)} + 1) - a_{1(2)}^{\alpha_{1(2)}} - 1}{a_{1(2)} - 1}.$$

Коэффициенты c_1, c_2, a_1 и a_2 вычисляются по формулам [18] на основании дополнительных опытов (табл. 2, строки 6 - 9). По найденным значениям $\alpha_1 = 0,35$ и $\alpha_2 = 1,09$ выполнен переход к кодированным значениям факторов:

$$x_{1(2)} = \frac{\xi_{1(2)} - \xi_{\text{ср}1(2)}}{\xi_{\text{ср}1(2)} - \xi_{\text{мин}1(2)}}. \quad (19)$$

Итоговая зависимость получена после подстановки (19) в (17) и раскрытия скобок:

$$k = 1,39 - 1,133d^{0,35} + 0,453w^{1,09} - 0,077d^{0,35}w^{1,09}. \quad (20)$$

Проверка адекватности модели выполнена по критерию Фишера. Расчетное значение составило $F_p = 3,386$. Табличное значение $F_T = 3,9$ определено по [17] для $P = 95 \%$, $n_1 = 3$ и $n_2 = 9$. Так как $F_T > F_p$, полученный полином (20) адекватно описывает опытные данные. Графически зависимость $k = F(d, w)$ представлена на рис. 5.

Обсуждение результатов

Из анализа рис. 5 следует, что ширина шпаций в большей степени влияет на распределение электромагнитного поля в древесине по сравнению с размером воздушных зазоров. С увеличением ширины шпаций коэффициент неоднородности увеличивается практически линейно, а с увеличением воздушных зазоров – уменьшается, причем нелинейность проявляется при малых значениях d . Таким образом, введение воздушных зазоров между электродами и штабелем не только предотвращает искрение, но и способствует более равномерному процессу сушки. Однако промежуточные вычисления показали, что при этом снижается средний уровень напряженности электрического поля, а значит и интенсивность испарения влаги из древесины.

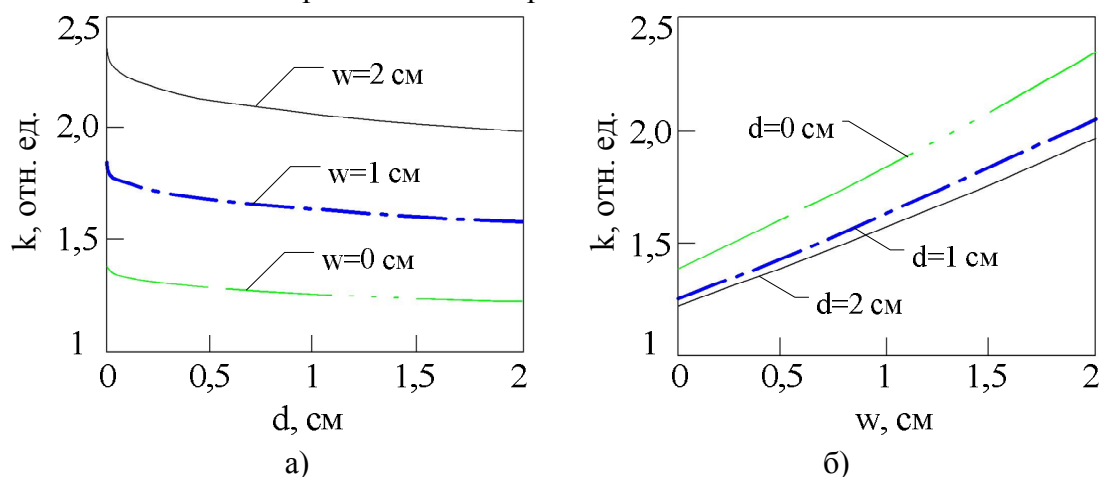


Рис. 5. Графики зависимости $k = F(d)$ при $w = \text{const}$ (а) и $k = F(w)$ при $d = \text{const}$ (б)

Fig. 5. Dependency graphs of functions $k = F(d)$ if $w = \text{const}$ (a) and $k = F(w)$ if $d = \text{const}$ (b)

Заключение

Полученные в работе результаты могут быть полезны проектировщикам для оптимизации конструкции ВЧ сушильных камер и эксплуатирующему их персоналу при выборе способа укладки штабеля. Так, зависимость (20) позволяет рассмотреть с точки зрения равномерности поля два типа конвективно-высокочастотных установок: с продольной и поперечной циркуляцией воздуха. В первом варианте шпации необходимы, во втором они никак не способствуют прохождению воздуха через штабель, а, наоборот, создают паразитные завихрения. Предположим, что в установке с продольной циркуляцией воздуха $d = 2$ см, $w = 2$ см, а в установке с поперечной циркуляцией воздуха $d = 2$ см, $w = 0$ см. Тогда для первой $k = 1,975$, для второй $k = 1,22$, то есть отношение максимальной напряженности к средней в первом варианте конструкции больше в 1,619 раза. Отсюда следует, сушка может быть проведена более качественно в установке с поперечной циркуляцией. Это же относится и к вакуумно-высокочастотным установкам, в которых воздух перестает играть роль агента сушки, поэтому укладку штабеля осуществляют без шпаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Watanabe, K. Softwood heating in radio frequency fields [Text] / K. Watanabe, A. Abubakari, C. Lazarescu, S. Avramidis // European journal of wood and wood production. – 2011. – Vol. 69. – pp. 295-301.
2. Resch, P. High-frequency electric current for drying of wood – historical perspectives [Text] / H. Resch // Maderas. Ciencia y tecnología. – 2006. – Vol. 8(2). – pp. 67-82.
3. Качанов, А.Н. Повышение энергоэффективности камер для вакуумно-диэлектрической сушки [Текст] / А.Н. Качанов, Д.А. Коренков // Лекции 2-ой Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы

энергосбережения и энергоэффективности в технических системах». Тамбов: Изд-во Першина Р.В. – 2015. – С. 84-92.

4. Сафина, А.В. Анализ потенциалов снижения затрат деревообрабатывающих предприятий [Текст] / А.В. Сафина // Деревообрабатывающая промышленность. – 2013. – № 4. – С. 40-43.

5. Расев, А.И. Особенности развития техники и технологии сушки пиломатериалов на современном этапе [Текст] / А.И. Расев // Вестник Московского государственного университета леса – Лестной вестник. – 1998. – № 4. – С. 28-34.

6. Koumoutsakos, A. Radio frequency vacuum drying of wood. I. II. Experimental model evaluation [Text] / A. Koumoutsakos, S. Avramidis, S.G. Hatzikiriakos // Drying technology. – 2001. – Vol. 19(1). – P. 85-98.

7. Качанов, А.Н. Математическая модель распределения электромагнитного поля в длинных плоских конденсаторах с диэлектриком из древесины [Текст] / А.Н. Качанов, Д.А. Коренков // Промышленная энергетика. – 2016. – №9. – С. 23 -27.

8. Пат. 2073314 Российская Федерация. Устройство для диэлектрического нагрева длинномерного материала – Лондон С.Е., Портяки А.А. – опубл.: 10.02.1997. – Бюл. № 33.

9. Пат. 2210874 Российская Федерация. Установка для нагрева в поле токов высокой частоты древесины и других диэлектриков (варианты) – Рыболовцев В.П. – опубл. 20.08.2003.

10. Дьяконов, К.Ф. Сушка древесины токами высокой частоты [Текст] / К.Ф. Дьяконов, А.А. Горяев. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 168 с.

11. Семёнов, Н.А. Техническая электродинамика [Текст] / Н.А. Семенов. – М.: Энергия, 1973. – 480 с.

12. Torgovnikov, G.I. Dielectric properties of wood and wood based materials [Text] / G.I. Torgovnikov. – Berlin: Springer Verlag, 1993. – 194 p.

13. Воробьев, Г.И. Лесная энциклопедия [Текст]. В 2 т. Т.1. / Г.И. Воробьев, Н.А. Анучин, В.Г. Атрохин, В.Н. Виноградов. – М.: Сов. энциклопедия, 1985. – 563 с.

14. Золотарев, В.В. Распределение стационарного электрического поля в цилиндрическом неидеальном диэлектрике [Текст] / В.В. Золотарев, В.П. Карпушенко, В.М. Золотарев, А.А. Науменко [и др.], // Электротехніка і Електромеханіка. – 2008. – № 4. – С. 65-69.

15. Попов, В.А. Теория вероятностей [Текст]. В 2 ч. Ч. 2. Случайные величины: Учебное пособие. – Казань: Казанский университет, 2013. – 45 с.

16. Шпиганович, А.Н. Случайные импульсные потоки [Текст]: Учебное пособие / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, В.И. Бош. – Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, Липецк: ЛГТУ, 2004. – 292 с.

17. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

18. Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике [Текст] / Б.А. Ивоботенко, Н.Ф. Ильинский, И.П. Коплов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.

Ключевые слова: математическое моделирование, планирование эксперимента, электромагнитное поле, коэффициент неоднородности, высокочастотная сушка, диэлектрическая сушка, сушка древесины

Сведения об авторах

Качанов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Электрооборудование и энергосбережение»; 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95; ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; e-mail: kan@ostu.ru.

Коренков Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры «Электрооборудование и энергосбережение»; 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95; ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; e-mail: dimas.corenkov@yandex.ru.