

УДК 621.317.335.3:621.365.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДРЕВЕСИНЫ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

А.Л. АДАМОВИЧ

(Полоцкий государственный университет)

С использованием метода линии передачи и соотношений Дебая получены соотношения для влажностной и температурной дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости древесины при параллельной и перпендикулярной ориентации относительно волокон электрического вектора напряженности СВЧ-поля.

Введение. Диэлектрические свойства любого вещества являются ключевыми параметрами, которые характеризуют взаимодействие электромагнитного поля с физической средой. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ является комплексной величиной и определяет характер взаимодействия электромагнитного поля с веществом - в комплексной форме она входит в материальные уравнения электродинамики, а мнимая часть определяет диссипативные потери.

Дисперсные пористые материалы - гетерогенные многофазные системы, состоящие из скелета, связанной и свободной воды, поэтому диэлектрическая проницаемость будет определяться влагосодержанием u , температурой T и зависеть от ориентации электрического вектора E напряженности зондирующего электромагнитного поля в случае анизотропного строения материала. Указанные зависимости необходимо учитывать при физико-математическом моделировании процессов нестационарного сверхвысокочастотного СВЧ-нагрева и сушки материалов, так как диэлектрическая проницаемость динамически изменяется не только во времени, но и в объеме образца.

Известные аналитические методы расчета (рефракционные модели) диэлектрической проницаемости гетерогенных смесей в зависимости от объемных долей компонентов, входящих в их состав справедливы для смесей с определенной формой частиц компонентов, ограничены узким диапазоном параметров и требуют экспериментальной проверки. Поэтому чаще прибегают к опытному определению диэлектрической проницаемости ϵ .

Целью данной работы является экспериментальное определение тензора комплексной проницаемости $\begin{bmatrix} \epsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & \epsilon_{\parallel} \end{bmatrix}$ древесины на частоте $f = 2,45$ ГГц в зависимости от ориентации вектора напряженности электромагнитного поля относительно волокон древесины, влажности u , температуры T и получение аппроксимирующих зависимостей $\epsilon(u, T)$.

Методика проведения измерений. Метод линии передачи широко используется для определения диэлектрической проницаемости ϵ в СВЧ-диапазоне жидких и твердых диэлектриков и заключается в измерении S -параметров отрезка волновода (измерительной ячейки), содержащего исследуемый образец. По измеренным параметрам отражения/передачи судят о величине ϵ . Кроме того, этот метод позволяет измерить S -параметры образца древесины при падении на него волны с разной ориентацией вектора E относительно волокон. При проведении измерений S -параметров потребуются большая точность, использование специальных приборов и устройств, их калибровка. Величину диэлектрической проницаемости необходимо определять с применением численных либо графических методов. S -параметры волноводной линии, содержащей исследуемый образец, определяются соотношениями [1, 2]:

$$S_{11} = R_1^2 \frac{\Gamma(1-z^2)}{1-\Gamma^2 z^2}; S_{21} = R_1 R_2 \frac{z(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2 z^2}; S_{11}^{sc} = R_1^2 \frac{-2\beta\delta + (\delta+1 + (\delta-1)\beta^2)th(\gamma d)}{2\beta + (\delta+1 - (\delta-1)\beta^2)th(\gamma d)};$$

$$\gamma = j\sqrt{\omega^2 \epsilon / c^2 - (2\pi/\lambda_{cp})^2}; \gamma_0 = j\sqrt{\omega^2 / c^2 - (2\pi/\lambda_{cp})^2};$$

$$R_1 = e^{-\gamma_0 l_1}; R_2 = e^{-\gamma_0 l_2}; \beta = \gamma/\gamma_0; \delta = e^{-2\gamma_0 l_2}; \Gamma = \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma_0 + \gamma}; z = e^{-\gamma d},$$

где S_{11}^{sc} и S_{11}^{cn} – коэффициенты отражения линии в режиме короткого замыкания и согласованной нагрузки соответственно; S_u – коэффициент передачи; ω – циклическая частота зондирующего электромагнитного

поля, Гц; ϵ – комплексная диэлектрическая проницаемость материала; c – скорость света ($c = 2,997925 \cdot 10^8$ м/с); λ – длина волны в волноводе, м; $\lambda_{кр}$ – длина волны, соответствующая критической частоте, и для прямоугольного волновода равна $2a$, м (a – ширина прямоугольного волновода, м); L_1 – расстояние от референсной плоскости до образца (рис. 1), м; L_2 – расстояние от короткозамкнутой стенки волновода до образца, м; d – толщина образца, м.

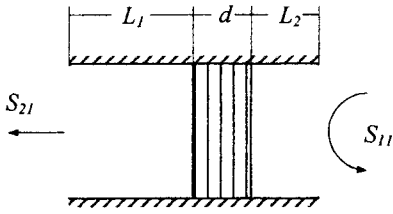


Рис. 1. Волноводная ячейка с образцом

Измерение S-параметров отрезка прямоугольного волновода сечением 90×45 мм с образцом древесины произведено на установке (рис. 2), состоящей из генератора СВЧ Г4-79 (диапазон частот 1,16...1,78 ГГц, выходная мощность $3 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-8}$ Вт), частотомера ЧЗ-46 (диапазон частот 1,5...12 ГГц, минимальная величина входного сигнала 200 мкВт), измерительной линии Р1-17 (диапазон частот 0,5...3 ГГц, коэффициент стоячей волны (КСВ) $\leq 1,04$, погрешность индикации положения зонда 0,05 мм, детекторный СВЧ-диод Д603), коаксиальных направленных ответвителей (диапазон частот 2...5 ГГц), детекторных головок (СВЧ-диоды Д603), коаксиально-волноводных переходов.

Сигналы с выхода детекторных головок измерялись при помощи аналого-цифрового преобразователя ADCS200K-16-16. Измерительная линия применялась только для определения фазы коэффициента отражения через положения минимума x_{min} отраженного сигнала $\varphi = 180 \cdot 4/\lambda (x_{min} - x_{0min})$ [3].

Специально изготовленные коаксиально-волноводные переходы настраивались при помощи индикатора КСВН и ослабления Я2Р-67, генератора качающейся частоты ГКЧ-53 для достижения максимально низкого коэффициента стоячей волны (КСВ $\leq 1,02$) на частоте 2,45 ГГц с использованием согласованной водяной нагрузки.

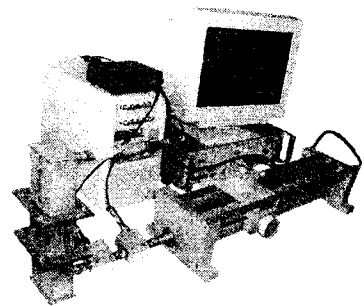
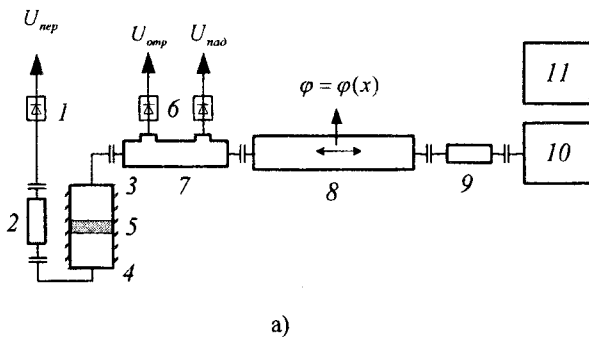


Рис. 2. Измерительная установка:

а – схема установки; б – общий вид установки;

- 1, 6 – детекторные головки; 2 – аттенуатор 10 дБ; 3, 5 – коаксиально-волноводные переходы;
- 4 – измерительная ячейка с образцом; 7 – направленные ответвители; 8 – измерительная линия Р1 – 17;
- 9 – аттенуатор 10 дБ; 10 – генератор СВЧ Г4-79; 11 – частотомер ЧЗ-46

Калибровка измерительной системы. Из-за наличия индуктивных и резистивных потерь в коаксиально-волноводном тракте будут внесены погрешности в измерения коэффициентов отражения

линии в режиме короткого замыкания $S_{11}^{кр}$ и согласованной нагрузки $S_{11}^{сн}$. Поэтому необходимо определить собственные S-параметры коаксиально-волноводного перехода, чтобы затем скорректировать реальные значения коэффициентов отражения относительно измеренных. Пусть e – собственные S-параметры коаксиально-волноводного перехода, представленного в виде сигнального графа (рис. 3), S'_{11} – измеренное значение, а S_{11} – истинное значение коэффициента отражения. Получим:

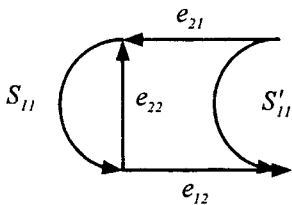


Рис. 3. Сигнальный граф

$$S'_{11} = e_{11} + \frac{e_{21}e_{12}S_{11}}{1 - S_{11}e_{22}} = \frac{e_{11} - e_{11}S_{11}e_{22} - e_{21}e_{12}S_{11}}{1 - S_{11}e_{22}};$$

$$S'_{11} - S'_{11}S_{11}e_{22} = e_{11} - e_{11}S_{11}e_{22} + e_{21}e_{12}S_{11};$$

$$S'_{11} = S_{11}(e_{21}e_{12} - e_{11}e_2) + e_{11} + S'_{11}S_{11}e_{22};$$

$$S_{11} = S_{11}K_1 + K_2 + S'_{11}S_{11}K_3;$$

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & 1 & S_{11}^{uzM} S_{11} \\ S_{11_2} & 1 & S_{11_2}^{uzM} S_{11_2} \\ S_{11_3} & 1 & S_{11_3}^{uzM} S_{11_3} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} S_{11}^{uzM} \\ S_{11_2}^{uzM} \\ S_{11_3}^{uzM} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$S_{11} = \frac{S_{11}^{uzM} - K_2}{S_{11}^{uzM} K_3 + K_1}. \quad (2)$$

Калибровочное соотношение (2) позволяет найти реальное значение S_{11} , при измеренном S'_{11} и известных поправочных коэффициентах $K_1...K_3$, которые в свою очередь находятся из (1) при измерении параметров нагрузок с известными характеристиками. В качестве таких нагрузок использовался волновод с короткозамыкающим поршнем при его положениях на расстоянии 0, $\lambda_g/2$ и $\lambda_g/4$ от плоскости отсчета.

Проверка методики проводилась измерением диэлектрической проницаемости ϵ дистиллированной воды. Аналитические зависимости ϵ'_g и ϵ''_g воды выражаются дисперсионными выражениями Дебая [4 – 6]:

$$\epsilon'_g = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + (2\pi f \tau_g)^2}, \quad \epsilon''_g = \frac{2\pi f \tau (\epsilon_0 - \epsilon_\infty)}{1 + (2\pi f \tau_g)^2}; \quad (3)$$

$$\epsilon_0 = 87,80685 - 0,399233T + 8,17525 \cdot 10^{-4}T^2;$$

$$\tau_g = \frac{1}{2\pi 10^9} \frac{1}{8,98 + 0,3128T + 4,7 \cdot 10^{-3}T^2 - 2,12 \cdot 10^{-3}T^3},$$

где ϵ_0 – статическая диэлектрическая проницаемость; $\epsilon_\infty = 4,9$ – диэлектрическая проницаемость при $f \rightarrow \infty$; f – частота поля 2,45 ГГц; τ_g – время релаксации молекулы воды, с; T – температура, °С.

Расчетная диэлектрическая проницаемость воды по формулам (3) составила $\epsilon_g = 77,7 - j9,7$. Экспериментально определенное значение диэлектрической проницаемости ϵ_g составляет $\epsilon_g = 75,5 - j9,7$ (при $T = 23$ °С, $f = 2,45$ ГГц). Хорошее согласование экспериментального значения ϵ_g воды с расчетным позволяет судить о достоверности измерений.

Результаты измерений и их анализ. Образцы древесины помещались в измерительную ячейку, снимались напряжения $U_{над}$, $U_{отр}$, $U_{пер}$ с детекторных головок и определялась фаза отраженной волны ϕ_{11} в режимах короткозамкнутой и согласованной линии, затем вычислялись комплексные S_{11}^{KZ} (при $L_2 = 0$), S_{11}^{CN} и $|S_{21}|$. В качестве образцов использовались сосновые бруски с разным влагосодержанием толщиной $d = 0,019...0,022$ м, однородные по структуре. Влагосодержание определялось по стандартной методике путем полного высушивания образцов. Реальные значения S_{11}^{KZ} , S_{11}^{CN} определялись по калибровочной формуле (5); $\epsilon(|S_{11}^{KZ}|, |S_{11}^{CN}|, |S_{21}|)$ находились по точке пересечения кривых уровня $|S_{11}^{KZ}(\epsilon', \epsilon'')|$, $|S_{11}^{CN}(\epsilon', \epsilon'')|$ и $|S_{21}(\epsilon', \epsilon'')|$ [7].

На рис. 4 приведены графики экспериментально полученных вещественной и мнимой частей комплексного коэффициента диэлектрической проницаемости в зависимости от влажности u образцов древесины ($T = 23$ °С) при перпендикулярной ($\epsilon'_\perp, \epsilon''_\perp$) и параллельной ($\epsilon'_\parallel, \epsilon''_\parallel$) ориентации вектора напряженности E электрического поля относительно волокон образца. Аппроксимация экспериментальных зависимостей диэлектрической проницаемости ϵ от влажности u (при $T = 23$ °С) с высокой точностью ($R \geq 0,9955$) может быть сделана квадратичными функциями (см. рис. 4):

$$\epsilon'_\perp = 12,466u^2 + 6,4111u + 1,41, \quad \epsilon''_\perp = 2,5789u^2 + 1,3625u + 0,07;$$

$$\epsilon'_\parallel = 16,235u^2 + 9,8732u + 1,9, \quad \epsilon''_\parallel = 3,6755u^2 + 1,4116u + 0,25.$$

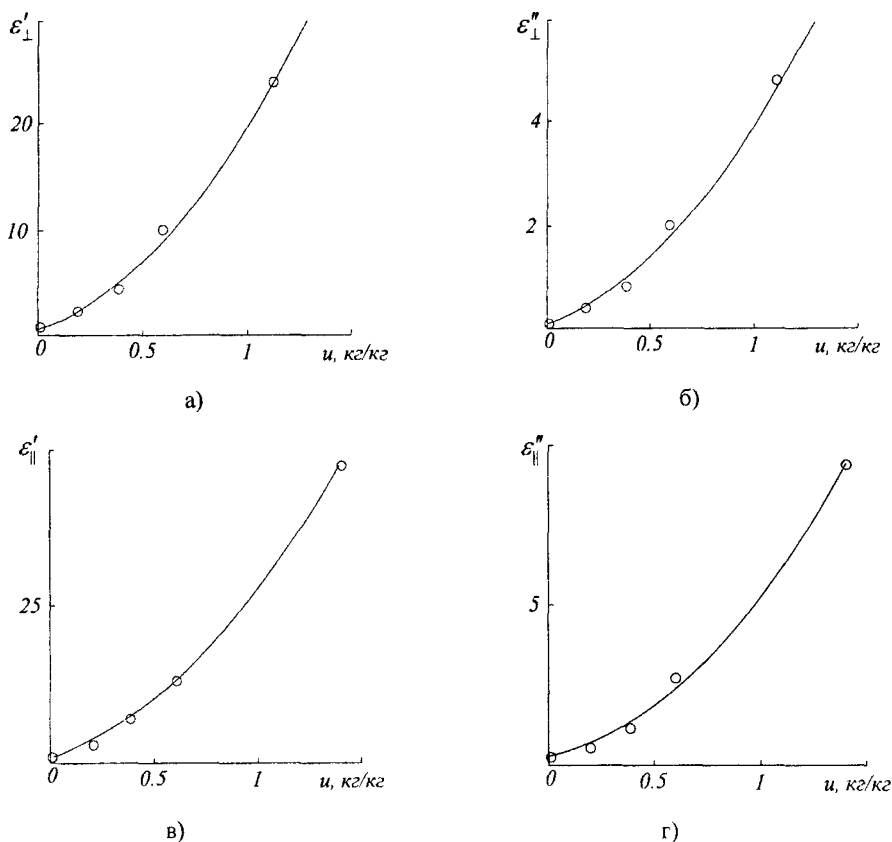


Рис. 4. Экспериментальные (о) и регрессионные (—) зависимости компонентов диэлектрической проницаемости ϵ древесины от влажности u при перпендикулярной (а, б) и параллельной (в, г) ориентации вектора \mathbf{E} относительно волокон при $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$

Как видно из графиков, диэлектрическая проницаемость в большой степени зависит от влагосодержания. При $u \rightarrow u_{\text{нас}}$ (насыщенность $\theta_l \rightarrow 1$) ϵ древесины приближается к ϵ_e воды $\epsilon_e = 77,7 - j9,7$.

Измерения количественно и качественно согласуются с [8] на частоте 2,45 ГГц, где определялась проницаемость некоторых пород древесины в диапазоне влажности от 0 до 30 %. Качественно согласуются с [9] на частоте 2,45 ГГц от 0 до 30 %, а также с [10], где измерялись характеристики некоторых пород на частоте 2...3 ГГц при влажности 5...17 %, и [11].

Кроме того, диэлектрическая проницаемость древесины также будет определяться и температурой T , поскольку согласно (3) имеется температурная зависимость диэлектрической проницаемости ϵ_e воды, насыщающей пористый образец. При увеличении температуры уменьшается время релаксации τ_e диполей воды, ϵ'_e и ϵ''_e уменьшаются, причем значительно (рис. 5) – при повышении температуры от 0 до 100 $^{\circ}\text{C}$ ϵ'_e снижается от 82 до 56, а ϵ''_e от 21 до 1,9.

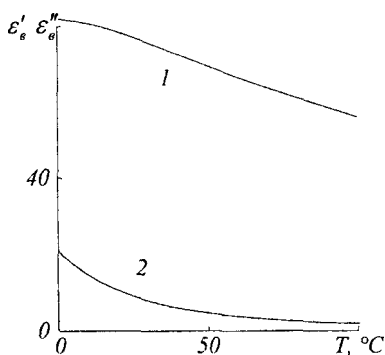


Рис. 5. Дисперсионные зависимости ϵ'_e (1) и ϵ''_e (2) воды от температуры $T, ^{\circ}\text{C}$

Чем больше пористость и насыщенность θ_i образца водой, тем сильнее будет сказываться температурная зависимость ϵ – при влажности выше уровня гигроскопичности ($u > 30\%$), при $\theta_i \rightarrow 1$ ввиду незначительности ϵ сухого дерева ($\epsilon_{\perp u=0} = 1,41 - i0,07, \epsilon_{\parallel u=0} = 1,9 - i0,25$) основной вклад в величину ϵ древесины будет вносить ϵ_w , а характер $\epsilon(T)_{u=const}$ древесины будет схож с характером зависимости $\epsilon_w(T)$, что также отмечается в [12].

В силу указанных обстоятельств, и полагая, что диэлектрическая проницаемость сухой древесины незначительно зависит от температуры, ϵ древесины можно представить следующей зависимостью:

$$\epsilon'(u, T) = \frac{\epsilon'(u, T = 23\text{ }^\circ\text{C}) - \epsilon'(u = 0, T = 23\text{ }^\circ\text{C})}{k'(T)} + \epsilon'(u = 0, T = 23\text{ }^\circ\text{C}); \tag{4}$$

$$\epsilon''(u, T) = \frac{\epsilon''(u, T = V\text{ }^\circ\text{C}) - \epsilon''(u = V, T = 23\text{ }^\circ\text{C})}{k''(T)} + \epsilon''(u = 0, T = 23\text{ }^\circ\text{C}), \tag{5}$$

где $k'(T) = \epsilon'_w(T = 23\text{ }^\circ\text{C})/\epsilon'_w(T)$, $k''(T) = \epsilon''_w(T = 23\text{ }^\circ\text{C})/\epsilon''_w(T)$.

На рис. 6 представлены зависимости ϵ'_\perp , ϵ''_\perp и ϵ'_\parallel , ϵ''_\parallel , полученные по формулам (4) и (5) в диапазоне температур $T = 0 \dots 100\text{ }^\circ\text{C}$ и влагосодержания $u = 0 \dots 1,5\text{ кг/кг}$.

Естественно, что экспериментальные данные, представленные на графиках рис. 6 при $T = 23\text{ }^\circ\text{C}$, совпадают с расчетными при данной температуре.

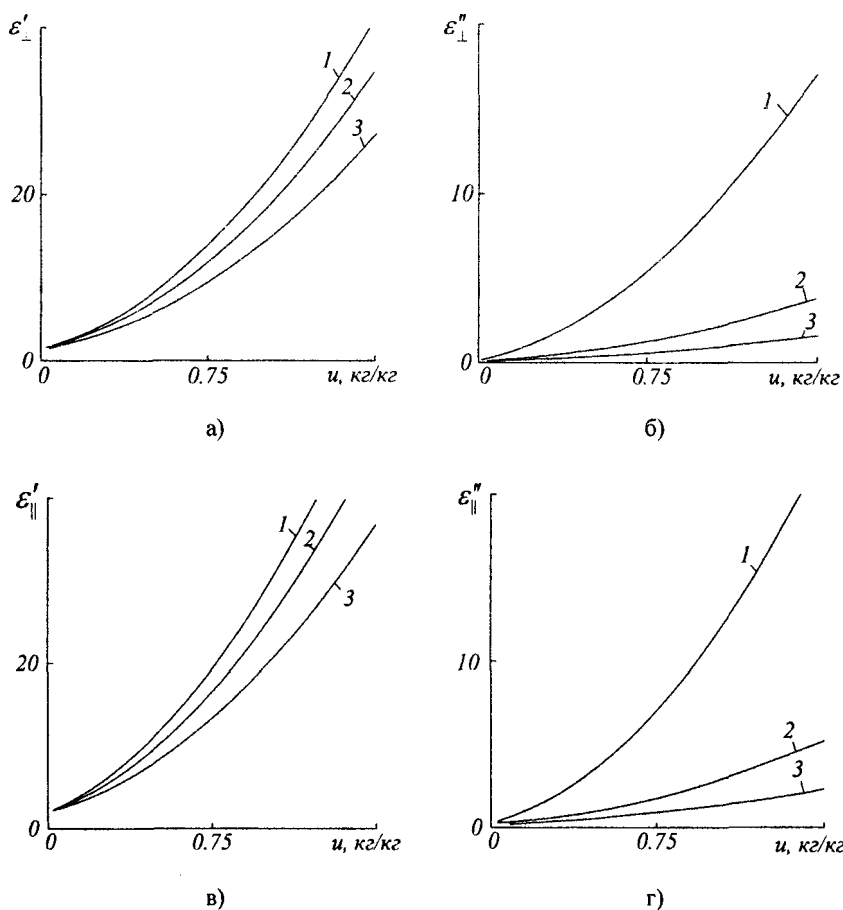


Рис. 6. Зависимость ϵ древесины от влажности u , кг/кг и температуры T , $^\circ\text{C}$ в перпендикулярной (а, б) и параллельной (в, г) ориентации \mathbf{E} относительно волокон

Изменение вещественной части диэлектрической проницаемости от температуры не велико, но значительно для мнимой части, которая определяет диссипацию электромагнитного поля в древесине при ее интенсивном СВЧ-разогреве.

Как видно из рис. 6, б, г, наибольшее поглощение СВЧ-энергии древесиной будет наблюдаться при пониженных СВЧ-температурах, близких к 0 °С. При повышении же температуры и уменьшении влаго-содержания мощность, выделяемая в виде тепла, в слое древесины будет падать, локализуясь преимущественно в областях, насыщенных влагой и менее нагретых, в чем проявится избирательность и саморегуляция СВЧ-электромагнитного нагрева.

Окончательно основные регрессионные выражения будут следующими:

$$\varepsilon'_{\perp} = \frac{12,466u^2 + 6,4111u}{k'(T)} + 1,41; \quad \varepsilon''_{\perp} = \frac{2,5789u^2 + 1,3625u}{k''(T)} + 0,07; \quad (6)$$

$$\varepsilon'_{\parallel} = \frac{16,235u^2 + 9,8732u}{k'(T)} + 1,9; \quad \varepsilon''_{\parallel} = \frac{3,6755u^2 + 1,4116u}{k''(T)} + 0,25, \quad (7)$$

где $k'(T) = -2 \cdot 10^{-7}T^3 + 6 \cdot 10^{-5}T^2 + 1,1 \cdot 10^{-3}T + 0,948$; $k''(T) = 3 \cdot 10^{-4}T^2 + 0,0174T + 0,461$.

Следует отметить, что отношения ε'_{\parallel} к ε'_{\perp} и $\varepsilon''_{\parallel}$ к ε''_{\perp} древесины оказываются больше единицы, как это видно из рис. 7.

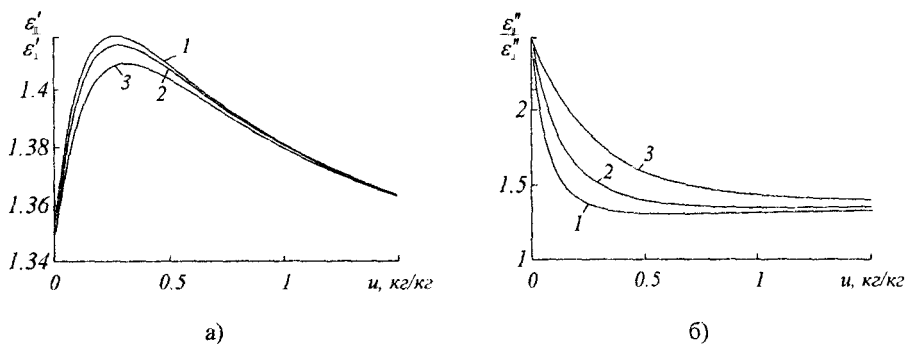


Рис. 7. Зависимости $\varepsilon'_{\parallel} / \varepsilon'_{\perp}$ (а) и $\varepsilon''_{\parallel} / \varepsilon''_{\perp}$ (б) от влагосодержания и температуры:
1 – 20 °С; 2 – 50 °С; 3 – 100 °С

При одинаковой влажности ε'_{\parallel} оказываются в 1,34...1,42 раз больше ε'_{\perp} , а $\varepsilon''_{\parallel}$ больше ε''_{\perp} в 1,4...2,5 раза, что может быть связано с разной подвижностью молекул целлюлозы в направлении и поперек волокон. Глубина проникновения поля δ_e и СВЧ-энергии δ_p при условии $\varepsilon''/\varepsilon' \ll 1$ может быть определена выражениями:

$$\delta_e = \frac{c}{\pi f \sqrt{\varepsilon' \varepsilon'' / \varepsilon'}}; \quad \delta_p = \frac{\delta_e}{2}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что при перпендикулярной ориентации поля относительно волокон древесины, глубина проникновения поля δ_e и СВЧ-энергии δ_p в 1,1...2 раза больше, чем при падении поля с вектором напряженности, параллельным волокнам.

На основании экспериментально измеренных S-параметров образца древесины (сосна) при $f = 2,45$ ГГц и зависимости Дебая $\varepsilon_e(T)$ получены полуэмпирические регрессионные зависимости (6) и (7) для тензора комплексной диэлектрической проницаемости древесины $\varepsilon(u, T)$ при продольной (ε_{\parallel}) и поперечной (ε_{\perp}) ориентации вектора \mathbf{E} падающего СВЧ-поля во всем диапазоне влагосодержания вплоть до насыщения в диапазоне температур $T = 0...100$ °С.

Замечено, что при одинаковой влажности ε'_{\parallel} и $\varepsilon''_{\parallel}$ оказываются соответственно в 1,2...1,5 раз выше ε'_{\perp} и ε''_{\perp} .

Таким образом, полученные в результате измерения дисперсионные соотношения (6) и (7) могут быть использованы при моделировании динамических процессов СВЧ-нагрева и сушки древесины в уравнениях теплопереноса, в уравнениях электродинамики при расчете распределения поля в неоднородном слое древесины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Backer-Jarvis J. Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements. - U.S.: Department of commerce, 1990. - 148 p.
2. Baker-Jarvis J., Vanzura E., Kissick W. Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. - 1990. - № 8. - Vol. 38. - P. 1096- 1102.
3. Чернушенко А.М. Конструирование экранов и СВЧ-устройств. - М.: Радио и связь, 1990. - 352 с.
4. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave remote sensing. - Dedham: Artech House, 1986. - Vol. 3: Volume scattering and emission theory, advanced systems and applications. - 1100 p.
5. Дебай П. Полярные молекулы. - М.: ГНТИ, 1931. - 247 с.
6. Strogryn A. Equations for calculating the dielectric constant of Saline Water // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. - 1971. - P. 734 - 736.
7. Zhiehong M., Seicbi O. Permittivity determination using amplitudes of transmission and reflection coefficients at microwave frequency // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. - 1999. - Vol. 47, № 5, - P. 546-555.
8. Dielectric properties of wood from 2 to 3 GHz / R. Olmi, M. Bini, A. Ignesti, C. Riminesi // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. - 2000. - Vol. 35, № 3. - P. 135 - 143.
9. Hamiyet Sahin, Nurgul Ay Dielectric properties of euramerican hybrid poplar (populus x. euramericana 1-214) // Management of fast growing plantations: Wood at microwave frequencies IUFRO Meeting, 11-13 September 2002, Ixmit, Turkey www.kavak.gov.tr
10. Microwave heating for accelerated fabrication of parquet / K. Thorsten, S. Werner, H. Jurgen, W. Werner // 33rd European Microwave Conference. - Munich, 2003. - P. 1333 - 1336.
11. Торговников Г.И. СВЧ-нагрев в технологии древесных материалов: Обзор. информ. / ВНИПИЭИ-леспром. - М., 1988. - 44 с.
12. СВЧ-энергетика: В 3 т. / Под. ред. Э. Окресса. - М.: Мир, 1971. - Т. 2: Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности, 1971. - 272 с.