

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И
ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.047.3

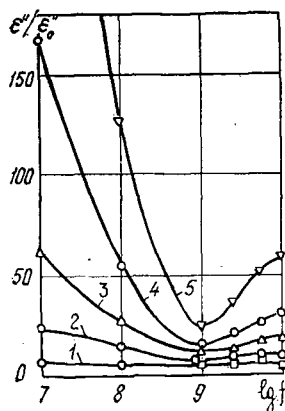
ВЫРАВНИВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПРИ СВЧ-СУШКЕ

А. Л. ГУТМАН, В. В. САУШКИН

Воронежский лесотехнический институт

Важным свойством сушки древесины и древесных материалов в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (СВЧ-сушка) является выравнивание влажности [2]. Однако до настоящего времени отсутствует описание физической сущности этого процесса. В частности, ошибочно объяснять выравнивание влажности φ увеличением одного лишь коэффициента поглощения с ростом влажности. На рис. 1, построенном по данным работы [3], представлены зависимости отношения ϵ''/ϵ_0'' (факторов диэлектрических потерь влажной и сухой древесины) от частоты электромагнитного поля f . Видно, что одним и тем же градиентам влажности в диапазоне высоких частот ($\lg f < 9$) соответствуют большие градиенты коэффициентов поглощения, чем в диапазоне сверхвысоких частот ($\lg f \geq 9$). Между тем, выравнивание влажности имеет место лишь при СВЧ-сушке.

Рис. 1. Зависимость отношения факторов диэлектрических потерь ϵ''/ϵ_0'' от частоты поля f при различных значениях влажности древесины φ : 1 — 10; 2 — 20; 3 — 30; 4 — 60; 5 — 100 %



Известно, что электромагнитное поле высокой частоты является квазистационарным (размеры неоднородности влажности значительно меньше длины волны), а поле сверхвысокой частоты — существенно волновым (размеры неоднородности соизмеримы или больше длины волны). Отсюда возникает необходимость электродинамического рассмотрения явления для оценки эффективности и длительности выравнивания влажности при СВЧ-сушке.

Модельная задача

Модельная задача должна раскрыть основной механизм перераспределения электромагнитного поля в материале с неоднородной влажностью. Вместе с тем, она должна быть достаточно простой для анализа, а ее решение должно содержать количественные характеристики

процесса. После рассмотрения ряда моделей мы остановились на задаче распространения электромагнитной волны вдоль бесконечной пластины с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , находящейся в бесконечной среде с меньшей диэлектрической проницаемостью ϵ_e ($\epsilon_e < \epsilon_1$) (рис. 2).

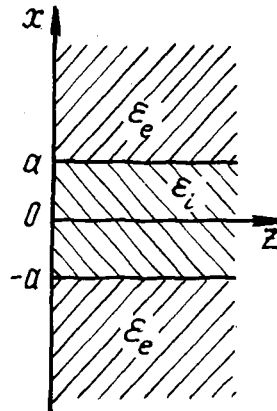


Рис. 2. Геометрия модельного расположения более влажной древесины ϵ_1 в более сухой ϵ_e

При характерных для древесных материалов размерах неоднородности ($2a$) и соотношениях между диэлектрическими проницаемостями при воздействии на них поля СВЧ вдоль оси z будет распространяться так называемая медленная поверхностная волна, в которой основная часть энергии передается по пластине $|x| < a$. Вне пластины электромагнитное поле экспоненциально затухает в направлении, перпендикулярном оси z . При существующих значениях комплексной диэлектрической проницаемости древесины [3] такое распределение поля определяется в основном вещественными частями проницаемостей. Поэтому задачу вначале можно решать для вещественных ϵ_e и ϵ_1 , а после определения полей поглощение может быть найдено по известным формулам, использующим факторы диэлектрических потерь ϵ_e'' и ϵ_1'' . В такой постановке задача имеет строгое электродинамическое решение для случая $\epsilon_e = 1$ [1]. Для анализа интересующих нас процессов рассмотрим случай $\epsilon_e \geq 1$.

Для поверхностных электромагнитных волн, поля которых не зависят от координаты y (двумерные), имеем следующие выражения [1].

В области $|x| > a$:

$$\begin{aligned} E_{xe} &= -iAhpe^{-px+ihz}; & E_{ze} &= -p^2Ae^{-px+ihz}; \\ H_{ye} &= i\epsilon_e kpAe^{-px+ihz}; & E_{ye} &= H_{xe} = H_{ze} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где

- A — коэффициент;
- h, p — продольное и поперечное собственные числа;
- k — волновое число свободного пространства, $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$;
- λ — длина волны;
- c — скорость света.

В области $|x| < a$ возможно существование двух типов волн с различной симметрией относительно плоскости $x = 0$: для четных волн

$$\begin{aligned} E_{xi} &= ihgB \cos gx e^{ihz}; & E_{zi} &= g^2B \sin gx e^{ihz}; \\ H_{yi} &= ikgB\epsilon_1 \cos gx e^{ihz}; & E_{yi} &= H_{xi} = H_{zi} = 0; \end{aligned} \quad (2)$$

для нечетных волн

$$\begin{aligned} E_{xi} &= -ihgB' \sin gx e^{ihz}; & E_{zi} &= g^2 B' \cos gx e^{ihz}; \\ E_{yi} &= -ikg\epsilon_1 B' \sin gx e^{ihz}; & E_{yi} &= H_{xi} = H_{zi} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где g — поперечное собственное число;
 B, B' — коэффициенты.

Из этих уравнений видно, что поперечное распределение поля при $|x| < a$ характеризуется величиной g , а интенсивность ослабления поля в направлении оси x при $|x| > a$ — величиной p . Из условий непрерывности касательных составляющих полей на границе сред при $x = a$ получаем следующие уравнения:

для четных волн

$$-p^2 A e^{-pa} = g^2 B \sin ga; \quad -\epsilon_e p A e^{-pa} = \epsilon_i g B \cos ga; \quad (4)$$

для нечетных волн

$$-p^2 A e^{-pa} = g^2 B' \cos ga; \quad \epsilon_e p A e^{-pa} = \epsilon_i g B' \sin ga. \quad (5)$$

Условие совместности решения алгебраических уравнений (4) и (5) дает соответственно два характеристических уравнения:

$$pa = \frac{\epsilon_e}{\epsilon_i} ga \operatorname{tg} ga; \quad (6)$$

$$pa^2 = -\frac{\epsilon_e}{\epsilon_i} ga \operatorname{ctg} ga. \quad (7)$$

Кроме того, величины p и g должны удовлетворять соотношениям

$$p^2 = h^2 - k^2 \epsilon_e; \quad g^2 = k^2 \epsilon_i - h^2, \quad (8)$$

отсюда

$$(ga)^2 + (pa)^2 = (ka)^2 (\epsilon_i - \epsilon_e). \quad (9)$$

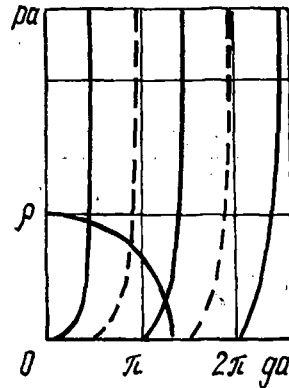
Уравнения (6) — (8) позволяют определять продольное h и поперечные собственные числа g, p , а уравнения (4) и (6) — соотношения между коэффициентами A и B, A и B' для четных и нечетных волн. После этого из уравнений (2) и (3) находим распределение полей, а, следовательно, и энергий в материалах разной влажности.

Уравнения (6) — (8) могут быть решены графически. Используем этот метод для качественной оценки решений. Правые части уравнений (6) и (7) при тех ga , при которых они положительны (поверхностные волны будут существовать только при положительной правой части), изображены на рис. 3 соответственно сплошной и пунктирной линиями. В силу соотношения (9) искомые значения ga и pa лежат на пересечении этих кривых с окружностью радиуса:

$$\rho = ka \sqrt{\epsilon_i - \epsilon_e}. \quad (10)$$

При $\rho < \pi$ имеется лишь один корень уравнения (6), который дает волну E_{00} . При $\rho > \pi$, наряду с волной E_{00} , возникает волна E_{20} , соответствующая второму корню, и т. д. Аналогично для уравнения (7) первый корень, появляющийся при $\rho > \pi/2$, соответствует волне E_{10} , при $\rho > 3\pi/2$ возникает еще волна E_{30} и т. д. Как видно из рис. 3, с увеличением ρ величина ga стремится к конечному пределу, в то время как pa неограниченно растет. Но это означает, что экспоненциальное ослабление поля в относительно сухой области $|x| > a$ будет тем сильнее, чем больше ρ . Таким образом, как это видно из (10), величинами, определяющими эффективность выравнивания влажности при сушке, являются частота электромагнитного поля f , характеристический размер

Рис. 3. Графический метод нахождения собственных чисел h, g, p



неоднородности влажности a и разность диэлектрических проницаемостей соседних областей с различной влажностью $(\epsilon_i - \epsilon_e)$.

Точное решение систем уравнений (6), (9) и (7), (9) возможно, например, методом итераций. После определения параметров h, p, g и соотношений между коэффициентами A, B и A', B' значения энергий W_e и W_i , поглощенных в более сухой и в более влажной части древесины, находят по выражениям

$$W_e = 2\epsilon_e'' \int_a^\infty E_e^2 dx; \tag{11}$$

$$W_i = 2\epsilon_i'' \int_0^a E_i^2 dx,$$

где ϵ_e'' и ϵ_i'' — соответствующие факторы диэлектрических потерь древесины;

$$E_e^2 = E_{xe}^2 + E_{ze}^2;$$

$$E_i^2 = E_{xi}^2 + E_{zi}^2.$$

Рассмотрим пример расчета с помощью разработанного алгоритма. Толщина пиломатериала $2a = 20$ мм. Значения $\epsilon_e, \epsilon_i, \epsilon_e''$ и ϵ_i'' для древесины примем по данным работы [3]. Результаты расчета показаны на рис. 4, из которого следует, что пока разность влажностей $\Delta\varphi$ соседних участков древесины велика, энергия электрического поля поглощается почти полностью влажной древесиной ($W_i/(W_i + W_e) \rightarrow 1$). По мере высыхания древесины $\Delta\varphi$ уменьшается (как показано стрелкой), доля энергии $W_i/(W_i + W_e)$, поглощаемая влажной частью, снижается и стремится к 0,5. При выравнивании влажности обеих частей отношение $W_i/(W_i + W_e)$ равно 0,5 (значения отношения меньше 0,5 объясняются тем, что в данной модели «сухая» древесина имеет бесконечную толщину). Заметное уменьшение $W_i/(W_i + W_e)$ для разных частот наблюдается при разных значениях $\Delta\varphi$: чем выше частота, тем меньше это значение $\Delta\varphi$. Другими словами, чем выше частота, тем эффективнее процесс выравнивания влажности. В диапазоне высоких частот ($f \leq 10^8$ Гц) выравнивание влажности при сушке не происходит.

Сам же механизм выравнивания влажности состоит в том, что до тех пор, пока разность влажностей соседних областей достаточно велика ($\epsilon_i \gg \epsilon_e$), основная часть электромагнитной энергии поглощается более влажной частью древесины. Доля энергии, поступающей в менее

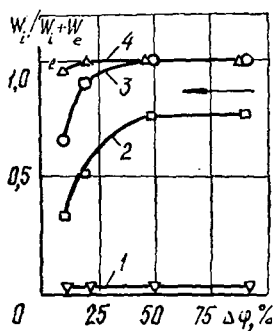


Рис. 4. Зависимость доли энергии $W_i/(W_i + W_e)$, поглощенной более влажной древесиной, от разности влажности $\Delta\phi$ соседних участков при частоте поля: 1— $1 \cdot 10^8$; 2— $1 \cdot 10^9$; 3— $2,4 \cdot 10^9$; 4— $5,8 \cdot 10^9$ Гц. (Стрелкой показано направление процесса при сушке).

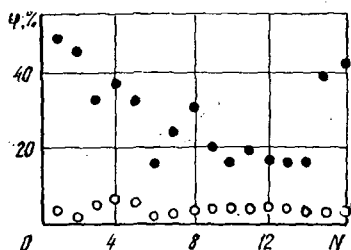


Рис. 5. Влажность ϕ образцов древесины (●—до сушки; ○—после СВЧ-сушки; N —порядковый номер образца)

влажную часть, увеличивается по мере сближения влажностей обеих частей.

Результаты экспериментальной проверки

Для экспериментальной проверки теоретических расчетов были отобраны 16 образцов древесины сосны влажностью от 16 до 49 % (рис. 5) и размерами $150 \times 100 \times 20$ мм. Их помещали в камеру СВЧ-установки резонаторного типа мощностью 1,5 кВт при частоте электромагнитного поля $f = 2,45 \cdot 10^9$ Гц. Режим сушки прерывистый: излучение включали на 5...8 мин с перерывами такой же длительности. В паузах термометром определяли температуру каждого образца и один из образцов (№ 15) взвешивали. Кривая сушки в виде зависимости текущей влажности ϕ образца № 15 от продолжительности сушки τ показана на рис. 6. Здесь же приведены интервалы включения СВЧ-поля: длина каждого штриха соответствует продолжительности облучения, а промежуток между штрихами — паузе. Из представленной зависимости видно, что для сушки до влажности 25...30 % достаточно нескольких минут, т. е. свободная влага при СВЧ-сушке удаляется из древесины достаточно быстро. Сушка образцов до влажности 2...5 % длится около 4 ч. Существенно то, что влажность всех образцов после высушивания в СВЧ-поле оказалась приблизительно одинаковой и колебалась

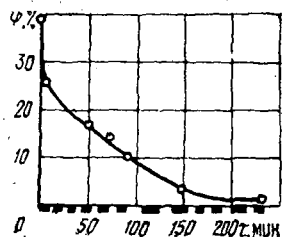


Рис. 6. Изменение влажности ϕ образца № 15 в процессе СВЧ-сушки