

О ПОВЫШЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ СУШКИ ПРИ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКАХ ТЕПЛА

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(Технический университет)
Московский пр., 26, г. Санкт-Петербург, 198013, Россия*

Интенсивность процессов сушки при внутренних источниках тепла (ВЧ- и СВЧ-нагрев) значительно (иногда в десятки и сотни раз) превышает интенсивность сушки традиционными методами [1–3]. Основным фактором, который обеспечивает столь существенное ускорение массопереноса, является возможность выделения во влажном материале значительной мощности тепловой энергии, вызывающей значительную скорость фазового превращения [3–5]. Однако скорость сушки ограничена электрической прочностью обрабатываемого материала. Сказывается также влияние сопровождающего сушку при внутренних источниках тепла градиента избыточного давления пара. Так, в легко фильтруемых материалах (материалах, характеризующихся большим коэффициентом паропроницаемости K_p) даже при очень высокой скорости испарения градиент давления незначительный. При обработке трудно фильтруемых материалов (коэффициент K_p мал) скорость сушки может быть повышена (также только за счет мощности q_v) лишь до того критического значения, при котором развившееся внутри материала избыточное давление не приведет к нарушению его механической прочности. Для таких материалов градиент давления является фактором, тормозящим электрофизические возможности метода ВЧ- и СВЧ-нагрева. Уместно подчеркнуть, что вопреки распространенным представлениям [6–8], ни собственно градиент избыточного давления пара как физическое явление, ни его величина ни при каких условиях (коэффициент K_p мал, или коэффициент K_p велик) не могут служить причиной, вызывающей увеличение скорости ВЧ- или СВЧ-сушки.

Наряду со сказанным, все же нельзя не отметить, что существующие представления о влиянии различных факторов на массоперенос в процессах сушки при внутренних источниках тепла в целом еще недостаточны для эффективного использования на практике всех преимуществ метода. Так, например, если воспользоваться экспериментальными или рассчитанными через коэффициент K_p значениями максимально допустимого значения избыточного давления [6, 9, 10], то оказывается, что они значительно занижены. Другими словами, скорость сушки могла бы быть существенно увеличена без опасности растрескивания материала.

В настоящей работе вопросы исследования механизма процессов нагрева и испарения рассматриваются в контексте анализа возможности разработки высокоинтенсивных режимов сушки материалов при внутренних источниках тепла.

Экспериментальная установка представляла собой сушильную камеру в виде плоскопараллельного рабочего конденсатора с перфорацией, подключенного к ВЧ-генератору типа ВЧГ2 – 4/27 (частота ЭМ-колебаний 27,12 МГц). Конструкция камеры позволяла при необходимости размещать между электродами и широкими сторонами образца диэлектрические прокладки толщиной 6 мм. Тем самым создавались различные в теплоизоляционном отношении условия для обработки образцов. В качестве последних использовали бруски древесины (ель, сосна) размером 200×115×12 мм различной влажности – материал, отличающийся низким коэффициентом K_p . Температуру на поверхности и в толще измеряли тонкими термодарами в моменты отключения анодного напряжения генератора. Дополнительно температура в некоторых точках по толщине образца контролировалась непрерывно керосиновыми термометрами. Результаты экспериментов представлены на рис. 1–4.

Наибольший температурный градиент наблюдается в наиболее сухом материале – рис. 1, что

можно объяснить концентрацией остаточной влаги в центральных слоях исходного образца, в то время как на поверхности образец более подсушен. В результате и высокочастотный нагрев периферийных слоев отстает от нагрева центральных. У более влажных образцов неравномерность распределения влагосодержания по толщине выражена менее резко.

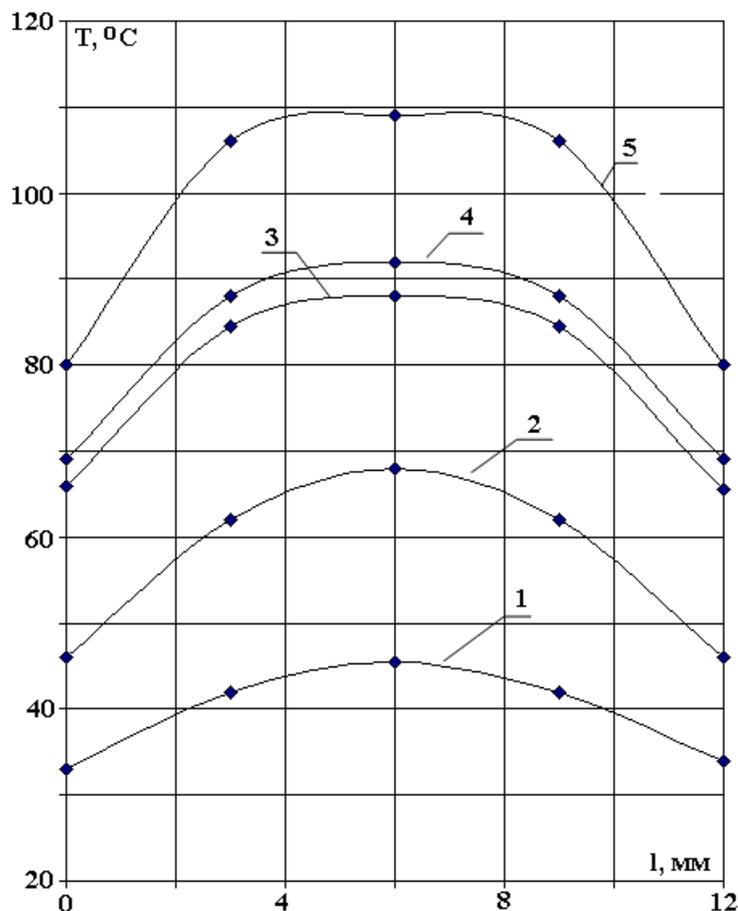


Рис. 1. Кривые распределения температур в образце ($u_n = 0,1$, $u_k = 0,07$; без диэлектрических прокладок) при τ , с: 1 – 15; 2 – 30; 3 – 60; 4 – 75; 5 – 90.

При приближении конструкции рабочей камеры к теплоизолированной температуры различных слоев материала закономерно выравниваются (рис. 2 – рис. 4). Существование небольшого температурного градиента в этом случае мы также склонны объяснять неравномерностью распределения влагосодержания в исходном образце.

Убыль влаги по достижении температуры фазового превращения незначительна (рис. 4), что согласуется с результатами других исследователей [2 – 5, 9]. Увеличение темпа нагревания (мощности внутренних источников тепла) мало сказывается на картине распределения температурного поля внутри материала (рис. 3 и 4). Можно лишь заметить (рис. 4, кривая 2), что при приближении к температуре фазового превращения температурное поле влажного материала выравнивается. В целом полученные экспериментальные данные указывают на высокую интенсивность сушки дерева при использовании внутренних источников тепла и возможность создания условий для его равномерного нагрева, однако не позволяют однозначно определить верхнюю границу скорости сушки. Обратимся для этого к теоретическому анализу механизма массопереноса.

Ограничимся случаем, когда после короткого периода прогрева высушиваемый материал можно считать тепло- и влагоизолированным со всех сторон. Влагоизоляция на поверхности не препятствует, однако, переносу влаги в виде пара. Стадия испарения начинается при достижении температуры фазового превращения. Поскольку далее температура тела практически не меняется

$\left(\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0\right)$, перенос влаги при наличии внутренних источников тепла происходит только в виде пара:

$$\varepsilon_\phi = 1 [2, 11].$$

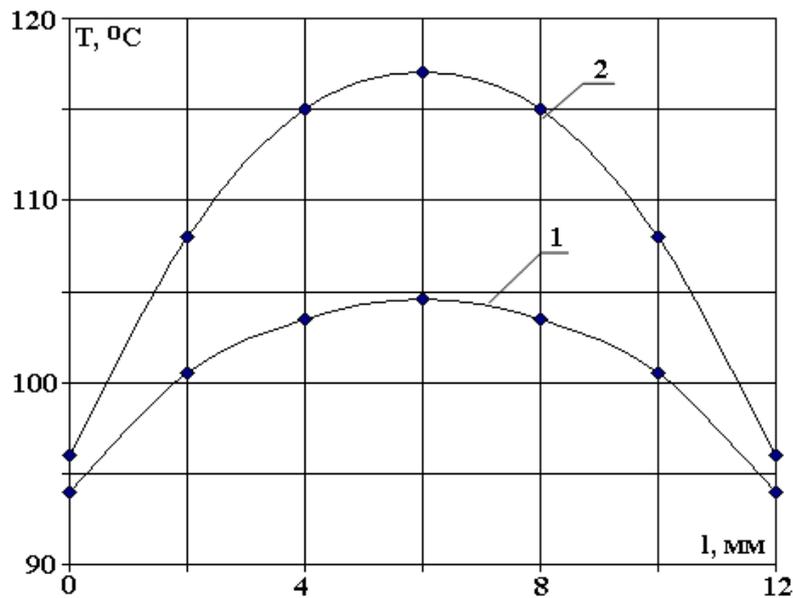


Рис. 2. Кривые распределения температур в образце с диэлектрическими прокладками ($u_n = 0,1$, $u_k = 0,07$) при τ , с: 1 – 90; 2 – 75.

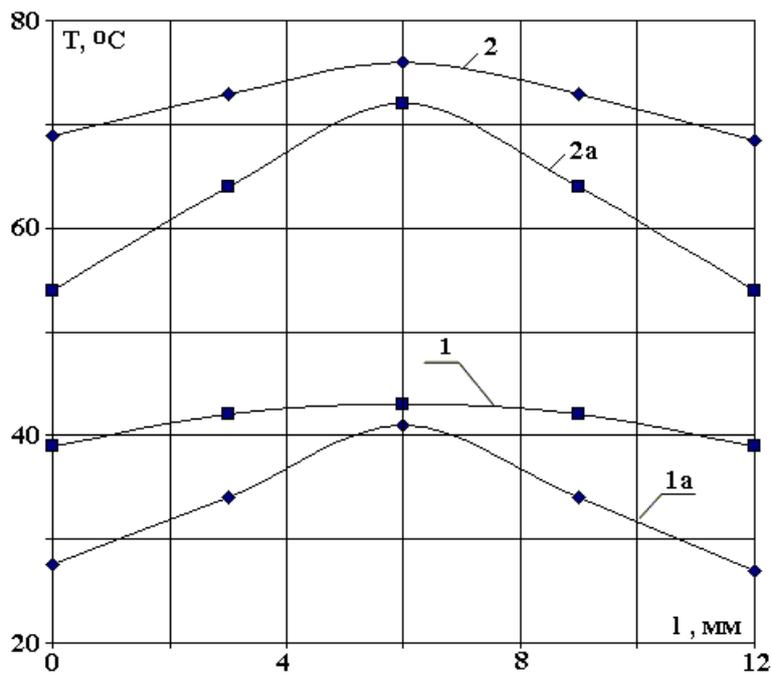


Рис. 3. Кривые распределения температур в образце ($u_n = 0,65$; 1,2 – с диэлектрическими прокладками; 1а, 2а – без прокладок) при τ , с: 1,1а – 15; 2, 2а – 30.

Пренебрегая ввиду незначительности [2, 9] градиентом влажности, запишем уравнение для распределения давления водяного пара в пластине толщиной $2l$:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = a_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + q_p \quad (1)$$

с начальным условием

$$P = P_0 \text{ при } \tau = 0 \quad (2)$$

и граничным условием

$$P = P_0 \text{ при } x = \pm l. \quad (3)$$

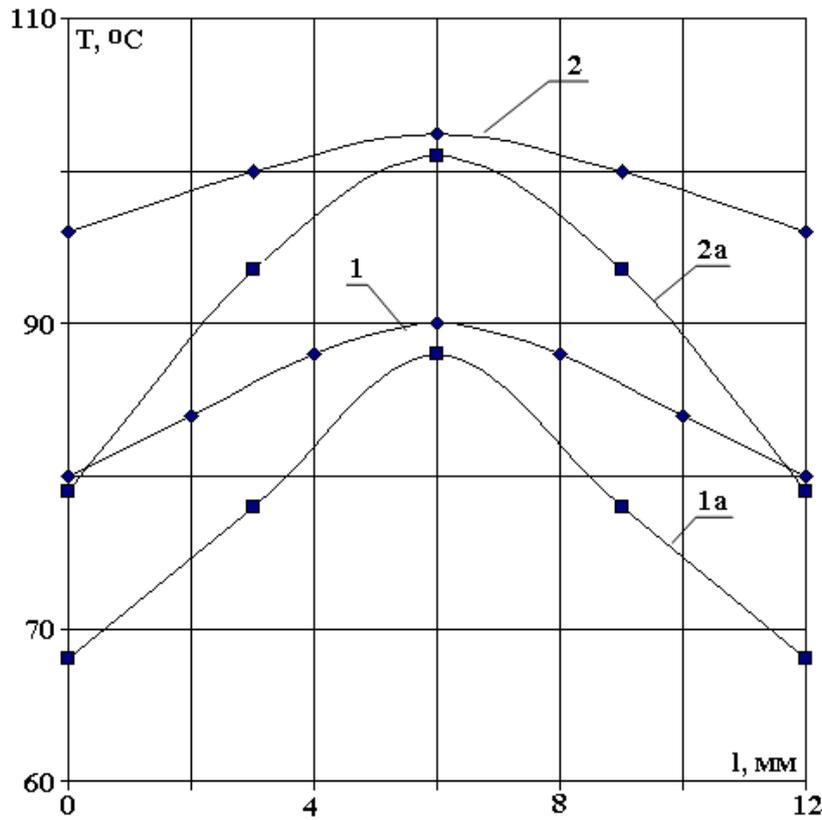


Рис. 4. Кривые распределения температур в образце ($u_n = 0,4$; 1,2 – с диэлектрическими прокладками; 1a, 2a – без прокладок) при τ , с: 1, 1a – 32; 2 – 40; ($u_k = 0,39$); 2a – 40 ($u_k = 0,37$).

Источник пара q_p , связанный с фазовыми превращениями, равен

$$q_p = -\varepsilon_\phi \frac{1}{c_s} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\varepsilon_\phi}{c_s} \cdot \frac{q_v}{r\rho_0}. \quad (4)$$

Из (4) непосредственно следует, что величина q_p (скорость испарения влаги внутри материала) полностью определяется мощностью внутренних источников тепла q_v :

$$q_v = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2. \quad (5)$$

Решение уравнения (1) с условиями (2) и (3) имеет вид [12]

$$P = P_0 + \frac{q_p l^2}{a_p} \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{x^2}{l^2} - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+3)^3} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \cdot \exp \left[-\frac{a_p (2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau \right] \right\}. \quad (6)$$

Максимальное давление достигается в центре тела ($x = 0$) при $\tau \rightarrow \infty$:

$$P_{\max} = P_0 + q_p \frac{l^2}{2a_p}. \quad (7)$$

Подставим в (7) правую часть равенства (4). Получим (при $\varepsilon_\phi = 1$)

$$P_{\max} = P_0 - \frac{l^2}{2a_p} \frac{1}{c_s} \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (8)$$

Для того чтобы воспользоваться приведенными решениями, необходимо знать коэффициент конвективной диффузии a_p или коэффициент паропроницаемости K_p , которые связаны между собой через удельную пароемкость материала c_s :

$$K_p = a_p c_s \rho_0, \quad (9)$$

где $c_s = \frac{bm}{\rho_0}$, $b = \frac{d\rho_n}{dP}$.

Учитывая (9), перепишем выражение (8) в виде

$$P_{\text{макс}} = P_0 + \frac{l^2 \rho_0}{2K_p} \left(-\frac{\partial u}{\partial \tau} \right). \quad (10)$$

Из уравнения (10) находится выражение для расчета наибольшей (максимально возможной) скорости сушки для достижения максимально допустимого избыточного давления:

$$\left(-\frac{\partial u}{\partial \tau} \right)_{\text{макс}} = \frac{P_{\text{изб макс}} 2K_p}{l^2 \rho_0}. \quad (11)$$

Прежде чем воспользоваться формулой (11), остановимся более подробно на физическом смысле параметров, входящих в уравнение (1) и его решения (6–8).

Из анализа уравнения (1) следует как общая закономерность, что перенос массы в процессах интенсивной сушки при внутренних источниках тепла носит характер фильтрационного движения пара. Величина избыточного давления пара, развиваемого в теле заданной толщины, определяется соотношением между скоростью внутреннего парообразования $\frac{\partial u}{\partial \tau}$ и коэффициентом конвективной

диффузии a_p . Чем больше гидродинамическое сопротивление тела для релаксации нарастающего давления, тем больше градиент давления. Однако если движущей силой процесса переноса пара является градиент давления, то движущей силой процесса внутреннего парообразования является градиент электрического напряжения (вызывающий мощность q_v).

Рост давления происходит потому, что пар не может мгновенно выйти за пределы материала – часть испарившейся жидкости накапливается в порах, и давление в материале возрастает.

В уравнении (1) член q_p характеризует накопление давления, а член $a_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$ – его рассасывание.

В переходной области (когда давление нарастает) скорость удаления пара или, иначе, среднеинтегральная скорость сушки $\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}$, меньше скорости фазового превращения $\frac{\partial u}{\partial \tau}$. С ростом давления поток

пара увеличивается до тех пор, пока скорость переноса пара не сравняется с количеством испарившейся в единицу времени жидкости. Очевидно, что в этот момент времени скорость фазового превращения $\frac{\partial u}{\partial \tau}$ равна $\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}$. Таким образом, подставлять в (11) среднеинтегральную скорость сушки

$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}$ можно только в случае малости параметра τ_y – времени установления давления.

Для оценки величины τ_y перепишем (6) в виде (при $x = 0$)

$$P_{\text{изб}}(\tau) = \frac{q_p l^2}{a_p} \left\{ 1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+3)^3} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} Fo' \right] \right\}, \quad (12)$$

где $Fo' = \frac{a_p \tau}{l^2}$.

В знакпеременном ряде (12) члены монотонно убывают по абсолютной величине и стремятся к нулю. Кроме того сумма ряда меньше первого слагаемого. Рассмотрим отношение первого слагаемого ряда ($n = 0$) к первому слагаемому в фигурных скобках и потребуем, чтобы оно не превышало $\sigma\%$:

$$\frac{32}{\pi^3} \exp \left(-\frac{\pi^2}{4} Fo' \right) \leq \frac{\sigma}{100}, \quad (13)$$

или $Fo' \geq \frac{4}{\pi^2} \ln \frac{\sigma \pi^3}{3200} = Fo'_{\text{мин}}$, $\tau_y = \frac{l^2}{a_p} Fo'_{\text{мин}}$.

В табл. 1 приведены результаты расчета $P_{изб\ макс}$ и $\left(-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}\right)_{расч\ макс}$, а также τ_y (при $\sigma = 1\%$, $Fo'_{мин} = 1,88$) для случаев ВЧ- и СВЧ-сушки древесины (ель). Значения $\left(-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}\right)_{эксп}$ соответствуют максимальным, при которых еще не наблюдалось растрескивание материала.

Таблица 1. Расчет τ_y , $P_{изб\ макс}$ и $\left(-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}\right)_{расч}$ для достижения $P_{пред}$

Номер опыта	$a_p \cdot 10^{-3}$, м ² /с	$2l$, мм	$\left(-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}\right)_{эксп}$, 10 ⁻³ 1/с	τ_c , с	τ_y , с	$P_{изб\ макс}$, Па	$\left(-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}\right)_{расч}$, 10 ⁻³ 1/с
1	0,145 [13]	75	0,877 [10]	840	18,2	$5,38 \cdot 10^5$	2,3
2	0,145 [13]	12	5,5 [14]	80	0,46	$0,864 \cdot 10^5$	93,6
3	0,145 [13]	62	1,63 [14]	240	12,5	$6,83 \cdot 10^5$	3,52

Можно видеть, что даже в теле значительной толщины время установления давления τ_y не превышает 5% от времени сушки τ_c (п.3 табл. 1). Значит, спустя короткий промежуток времени от начала процесса давление пара устанавливается, и $\frac{\partial u}{\partial \tau}$ становится равной $\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}$. Из данных табл. 1 также следует, что величина избыточного давления пара никак не связана с развиваемой скоростью сушки, величина которой определяется лишь мощностью q_v внутренних источников тепла.

Результаты расчета по формуле (11) максимально возможной среднеинтегральной скорости сушки $\left(-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}\right)_{расч}$ для достижения предела прочности влажной древесины ($P_{пред} = 1,47$ МПа [15])

приведены в последней колонке табл. 1. Эти данные показывают, что скорость сушки действительно могла бы быть существенно увеличена без опасности растрескивания материала. Причем наибольшей оказалась разница для самого тонкого образца (п.2 табл. 1) – расчетная и экспериментально достигнутая скорости сушки отличаются в 17 раз. Естественно предположить, что причиной обнаруженного несоответствия является приблизительность приводимых в литературе данных о коэффициенте пароили, иначе, воздухопроницаемости K_p , либо неучет зависимости этого коэффициента от каких-то факторов, в частности, для дерева [13, 16]. Более существенным, однако, является вопрос, могут ли физически быть созданы условия для увеличения скорости сушки.

Для ответа на этот вопрос образцы влажной древесины (ель) размером 200×115×12 мм нагревали под действием электрического поля высокой частоты в различных в теплоизоляционном отношении условиях. По достижении температуры ~100°С и непродолжительной (в случае экспериментов с теплоизолированными образцами) выдержки (1–2 мин) проводили сушку в форсированном режиме, для чего резко увеличивали мощность q_v внутренних источников тепла в стадии испарения. Образцы № 2 и 3 (табл. 2) проходили стадию нагрева в стесненных по сравнению с образцом № 1 условиях, так как были теплоизолированы от окружающей среды диэлектрическими прокладками, соответственно частично и полностью. Перед началом стадии испарения изоляционные прокладки из рабочего конденсатора извлекались.

В соответствии с полученными результатами (табл. 2) образцы, прошедшие стадию термообработки при повышенной температуре, допускают затем многократно более высокую скорость сушки, чем нетермообработанный образец № 1. Интересно отметить, что достигнутая скорость сушки для образца № 3 близка к расчетной максимально возможной – п.2 табл. 1. Обнаруженный эффект возможного существенного увеличения скорости сушки без опасности разрушения материала, основанный на использовании стадии его термообработки в теплоизолированных условиях, можно объяснить следующим образом.

Таблица 2. Экспериментальное определение максимальной скорости ВЧ-сушки образцов ($f=27,12$ МГц, $E = 0,5-0,7$ кВ/см)

Номер образца	Условие размещения в рабочем конденсаторе в стадии нагрева	u_n , кг/кг	u_k , кг/кг	$\left(-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}\right)_{\text{эксп}}$, 10^{-3} 1/с	Оценка качества
1	открыт	0,35	0,016	6,5	образование трещин вдоль волокон
2	теплоизолирован с двух широких сторон	0,345	0,015	37,2	без дефектов
3	теплоизолирован со всех сторон	0,35	0,015	78,0	без дефектов

При равномерном нагреве материала во всем объеме плавятся смолистые вещества и поры освобождаются. В результате коэффициент паропроницаемости K_p увеличивается. Поэтому максимальное достигнутое давление пара в таком теле меньше, чем в теле, не прошедшем стадию термообработки, при одной и той же скорости сушки. Или, иначе: одно и то же избыточное давление пара у термообработанного тела достигается при более высокой скорости сушки. Действительно, согласно [16] коэффициент K_p с температурой растет. Это позволяет после равномерной (рис. 2–4) выдержки всех слоев дерева при повышенной температуре увеличить интенсивность сушки, что и подтверждено экспериментально. Пористая структура у термообработанных образцов древесины и образцов, не прошедших термообработку, практически не меняется, о чем свидетельствуют проведенные нами контрольные эксперименты по сорбции влаги.

Что же касается упомянутого выше (табл. 1) несоответствия между реально достигаемой в «обычных» условиях ВЧ- и СВЧ-нагрева скоростью сушки и скоростью сушки, рассчитанной, исходя из предела прочности древесины (формула (11)), то, вероятно, определенную роль здесь играет толщина образцов. Более тонкие образцы, естественно, выдерживают меньшее давление. Поэтому расчет скорости сушки исходя из величины $P_{пред}$, определенной для образцов стандартной толщины [15], в данном случае приводит к завышенному результату, который в действительности не наблюдается (табл. 1). В «толстых» образцах значения расчетной и экспериментальной скоростей сушки коррелируют.

Полученные результаты расширяют представления о механизме сушки при внутренних источниках тепла. Обнаруженный эффект влияния теплоизоляционных условий термообработки влажного материала на возможность увеличения его скорости сушки может быть с успехом использован как технологический прием интенсификации процессов ВЧ- и СВЧ-сушки трудно фильтруемых материалов.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

a_p – коэффициент конвективной диффузии, m^2/c ; b – кинетический коэффициент, c^2/m^2 ; c_g – удельная пароемкость, 1/Па; E – напряженность электрического поля, В/м; f – частота ЭМ-поля, Гц; K_p – коэффициент паропроницаемости, с; l – толщина образца, м; m – пористость; P , P_0 , $P_{изб}$ – локальное, атмосферное и избыточное давление пара, Па; q_v – удельная мощность внутренних источников тепла, Вт/м³; r – удельная теплота фазового превращения, Дж/кг; u , \bar{u} – локальное и среднее влагосодержание материала; x – координата, м; δ – угол диэлектрических потерь, рад; ε , ε_0 – относительная и абсолютная диэлектрическая проницаемость, и электрическая постоянная, Ф/м; ε_ϕ – критерий фазового превращения; ρ_0 – плотность сухого материала, кг/м³; τ – время, с.

ИНДЕКСЫ

к – конечное значение; макс – максимальное значение; мин – минимальное значение; н – начальное значение; п – пар; пред – предельное значение; расч – расчетное значение; с – сушка; у – установление; эксп – экспериментальное значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нетушил А.В., Жуховицкий Б.Я., Кудин В.Н., Парини В.П.* Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / М.–Л., 1959.
2. *Долгополов Н.Н.* Электрофизические методы в технологии строительных материалов. М., 1971.
3. *Фельдман Н.Я.* Некоторые вопросы сушки древесины в микроволновом поле // *Деревообрабатывающая промышленность*. 1996. № 6. С. 4–7.
4. *Лебедев П.Д.* Теплообменные, сушильные и холодильные установки. М., 1972. С. 189–193.
5. *Юленец Ю.П., Марков А.В., Фролов Д.В.* Синтез активного оксида алюминия в высокочастотном электрическом поле повышенной напряженности // *Электронная обработка материалов*. 1994. № 1. С. 50–55.
6. *Лыков А.В.* Тепло- и массообмен в процессах сушки. М.–Л., 1956.
7. *Лыков А.В.* Теория сушки. М., 1968.
8. *Романков П.Г., Рашковская Н.Б., Фролов В.Ф.* Массообменные процессы химической технологии. Л., 1975.
9. *Lyons P.W., Hatcher J.D., Sunderland J.E.* Drying of porous medium with internal heat generation // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1972. V. 15. № 5. P. 897–905.
10. *Долгополов Н.Н., Симонян С.Г.* Сушка в поле сверхвысокой частоты. // *Электрофизические методы в технологии строительных материалов*. Сб. трудов ВНИИСМ, 1965. Вып. 2 (10). С. 30–33.
11. *Лыков Г.В., Максимов Г.А.* Исследование процесса сушки в поле высокой частоты // *Тепло- и массообмен в капиллярно-пористых телах*. М.–Л., 1957. С. 133–142.
12. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. М., 1964.
13. *Лыков А.В.* Теоретические основы строительной теплофизики. Минск, 1961.
14. *Марков А.В., Юленец Л.Ю.* Конвейерная сушка древесных заготовок в высокочастотном электрическом поле // *СПб-госуд. технол. ин-т*. СПб, 2001. 11с. Деп. в ВИНТИ 24.04.2001. №1073 – В2001.
15. *Боровиков А.М., Уголев Б.Н.* Справочник по древесине. М., *Лесная промышленность*. 1989.
16. *Харук Е.В.* Проницаемость древесины газами и жидкостями. Новосибирск, 1976.

Поступила 12.12.2001

Summary

It is shown that, in HF and microwave power spectrum there's a vague gap between theoretical, i.e. calculated with the help of convectional diffusion coefficient, and experimental rate of drying process, the latter being significantly lowed. The origin of the problem is due to vapour pressure gradient, its role, in mechanism of drying process up today investigated with white spaces and mistakes. Main characteristics of intensive drying process: the excessive vapour pressure, the vapour pressure time constant, the greatest possible value of evaporation rate are calculated. It is shown that the rate of drying process in wood under the internal heat generation may be significantly increased if its evaporation stage is preceded by the stage of heating in heat-insulating conditions.
