

Физическая аппаратура и ее элементная база

УДК 621.365.52

Математическая модель СВЧ-термообработки влажных материалов

А. В. Марков

Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(Технический университет), Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена математическая модель процесса лучевой СВЧ-термообработки, предназначенного для уничтожения вредителей (грибки, жучки, термиты) в материалах с неограниченным объемом (строительные конструкции зданий). Модель описывает нестационарный процесс распространения тепла в толще одно- и двухслойных материалов и учитывает перенос влаги как путем диффузии, так и фильтрационного движения пара. Приведены соотношения для расчета температурного и влажностного полей, а также времени достижения материалом заданной температуры на заданной глубине — основного параметра процесса СВЧ-термообработки.

Химические методы защиты материалов от вредителей (грибки, жучки, термиты) недолговечны и действуют лишь в поверхностных слоях. СВЧ-нагрев — не только наиболее эффективный, но по существу и единственно возможный [1, 2] метод тепловой обработки материалов в строительных конструкциях зданий и помещений (штукатурка, древесина, кирпичная кладка). Хотя аппаратное оформление данного процесса известно (лучевые СВЧ-камеры открытого типа [1–3]), режимы термообработки — времена СВЧ-облучения, обеспечивающие достижение заданной температуры на заданной глубине, остаются неизученными. Теоретическое решение данной задачи затруднено тем, что материалы, подлежащие термообработке, как правило, представляют собой двухслойные структуры, например, штукатурка—древесина, штукатурка—кирпичная кладка. В настоящей работе рассматриваются математическая модель и метод расчета процесса СВЧ-термообработки влажных материалов.

Основные допущения, положенные в основу построения модели, формулируются следующим образом: напряженность электрического поля в эффективной площади раскрытия рупорного излучателя постоянна; нагрев материала происходит [4] за счет энергии плоской ЭМ-волны; облучаемый материал представляет собой полупространство ($x > 0$); теплообмен поверхности материала с окружающей средой пренебрежимо мал; перенос тепла теплопроводностью к участкам необлучаемого объема за время облучения отсутствует; перенос влаги в материале до достижения температуры фазового превращения происходит только в виде жидкости (критерий

фазового превращения равен нулю [5]); при достижении температуры фазового превращения ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) перенос влаги происходит только в виде пара (критерий фазового превращения равен единице [5, 6]), причем вся выделяющаяся СВЧ-энергия расходуется на испарение.

Разделим процесс СВЧ-термообработки на две стадии. В первой стадии температура материала не достигает $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а перенос влаги осуществляется диффузионным механизмом. Уравнения модели в первой стадии процесса имеют вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{p(x, u)}{c_0 \rho_0}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2)$$

с краевыми условиями

$$T = T_0, u = u_0 \text{ при } \tau = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0;$$

$$a_m \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = \beta(u|_{x=0} - u_b), \quad (3)$$

где a_T , a_m — коэффициенты температуропроводности и теплопроводности переноса массы, соответственно;

β — коэффициент массообмена;

c_0 , ρ_0 — удельная теплоемкость и плотность материала, соответственно;

T_0 , u_0 — начальная температура и начальное влагосодержание, соответственно;

u_b — равновесное влагосодержание;

x — координата;

p — удельная мощность, выделяющаяся в материале при СВЧ-нагреве, равная

$$p(x, u) = 2\alpha(u) p_0 [1 - \gamma(u)] \exp[-2\alpha(u) x],$$

где p_0 — плотность потока падающей СВЧ-энергии (мощности).

Коэффициент затухания в материале плоской ЭМ-волны α и коэффициент отражения ЭМ-волны от поверхности материала γ выражаются следующим образом [7]:

$$\alpha = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_2'}{2} \operatorname{tg} \delta_2} \left[1 + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2} \right]^{-\frac{1}{2}},$$

$$\gamma = \left| \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \right|^2,$$

где $k_0 = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ — волновое число для вакуума;

f — частота ЭМ-поля;

μ_0, ϵ_0 — абсолютная магнитная и абсолютная диэлектрическая проницаемости вакуума, соответственно;

ϵ_1 — относительная диэлектрическая проницаемость воздуха;

$\epsilon_2 = \epsilon_2' - i\epsilon_2' \operatorname{tg} \delta_2$ — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость материала;

ϵ_2', δ_2 — вещественная часть относительной диэлектрической проницаемости и угол диэлектрических потерь материала, соответственно.

При постоянстве физических свойств материала уравнения (1–3) решаются аналитически

$$\begin{aligned} T(\tau, x) = & T_0 + \frac{2p_0(1-\gamma)}{\lambda} \times \\ & \times \sqrt{a_T \tau} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_T \tau}\right) - \frac{x}{2\sqrt{a_T \tau}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_T \tau}}\right) \right] + \\ & + \frac{p_0(1-\gamma)}{4\alpha\lambda} [-2\exp(-2\alpha x) + \exp(4\alpha^2 a_T \tau + 2\alpha x) \times \\ & \times \operatorname{erfc}\left(2\alpha\sqrt{a_T \tau} + \frac{x}{2\sqrt{a_T \tau}}\right) + \\ & + \exp(4\alpha^2 a_T \tau - 2\alpha x) \operatorname{erfc}\left(2\alpha\sqrt{a_T \tau} - \frac{x}{2\sqrt{a_T \tau}}\right)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u(\tau, x) = & u_0 - (u_0 - u_b) \left\{ \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_m \tau}}\right) - \right. \\ & \left. - \exp\left[\frac{\beta}{a_m} x + \left(\frac{\beta}{a_m}\right)^2 a_m \tau\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_m \tau}} + \frac{\beta}{a_m} \sqrt{a_m \tau}\right) \right\}. \quad (5) \end{aligned}$$

Сушка в данном случае — сопутствующий СВЧ-нагреву процесс. Наиболее быстро сохнет материалом из числа рассматриваемых является древесина. Оценим вклад СВЧ-сушки древесины диффузионным механизмом.

Согласно [8] время СВЧ-нагрева древесины средней влажности ($u_0 = 20\%$) до $T = 100^\circ\text{C}$ составляет 1–1,5 мин. Расчет поля влагосодержаний по уравнению (5) при $a_m = 6,17 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, $\beta = 8,7 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$ [5] показывает, что за время 1–1,5 мин влагосодержание древесины изменится (уменьшится) лишь на поверхности и составит: $u|_{x=0} = 19,36\%$. На глубине $x = 1 \text{ мм}$ и более влагосодержание останется без изменений. Иначе говоря, вклад сушки диффузионным механизмом пренебрежимо мал (сушка протекает очень медленно).

Таким образом, при моделировании процесса СВЧ-термообработки рассматриваемого назначения уравнение (2) с соответствующим краевым условием можно не принимать во внимание.

При достижении температуры $T = 100^\circ\text{C}$ в материале появляется зона сушки, отделяемая от зоны нагрева подвижной границей $x_s(\tau)$. С ростом времени граница достижения температуры $T = 100^\circ\text{C}$ смещается в толщу материала.

Уравнения, описывающие вторую стадию процесса (в течение которой перенос влаги осуществляется только в виде пара), имеют вид

$$0 \leq x \leq x_s(\tau):$$

$$T = \text{const} = 100^\circ\text{C},$$

$$-\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{1}{r p_0} p(x, u); \quad (6)$$

$$u|_{\tau=\tau_S(x)} = u_0; \quad (7)$$

$$x > x_s(\tau):$$

$$u = \text{const} = u_0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{p(x, u)}{c_0 \rho_0}, \quad T|_{x=x_s} = 100^\circ\text{C}, \quad (8)$$

где r — теплота парообразования;

τ_S — время достижения температуры $T = 100^\circ\text{C}$ на глубине x .

Уравнение (6) с условием (7), описывающее распределение влагосодержания, решается численно.

В случае СВЧ-термообработки двухслойного материала уравнения модели записываются для каждого слоя в отдельности и дополняются условиями на их границе

$$T_1|_{x=\sigma_1} = T_2|_{x=\sigma_1};$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\sigma_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\sigma_1}, \quad (9)$$

где T_1, T_2 — температуры слоев;

σ_1 — толщина первого (внешнего) слоя,

λ_1, λ_2 — коэффициенты теплопроводности слоев.

Мощность, выделяющаяся за счет СВЧ-облучения во втором (внутреннем) слое, определяется выражением

$$p_2(x, W_1, W_2) = 2\alpha_2(W_2) [1 - \gamma_1(W_1) p_{01} \times \exp[-2\alpha_1(W_1)\sigma_1] \exp[-2\alpha_2(W_2)(x - \sigma_1)]]. \quad (10)$$

Мощность, падающая на второй слой, равна

$$p_{02} = p_{01}[1 - \gamma_1(W_1)] \exp[-2\alpha_1(W_1)\sigma_1]. \quad (11)$$

В соотношениях (10) и (11) предполагается, что коэффициенты α и γ зависят от средних влагосодержаний W_1 и W_2 слоев составляющих материалов.

В общем случае уравнения (1), (8) с условиями (9) для двухслойной структуры материалов решаются только численно. Однако основным расчетным параметром процесса СВЧ-термообработки, предназначенного для уничтожения вредителей, является τ_n — время достижения заданной температуры на заданной глубине только второго слоя (древесина, кирпичная кладка). В этом случае, согласно произведенной численной оценке, второй слой оказывается практически теплоизолированным от первого:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\sigma_1} = 0. \text{ Тогда, используя (4), для расчета}$$

распределения температуры во втором слое двухслойной структуры материалов можно получить следующее аналитическое выражение:

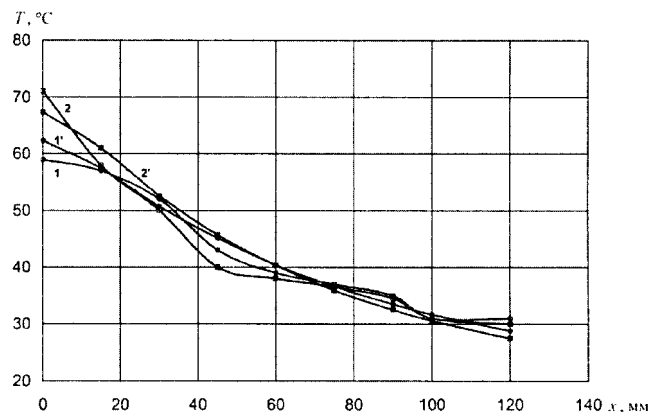
$$\begin{aligned} T_2(x, \tau) = T_0 + \frac{p_{01}[1 - \gamma_1(W_1)] \exp[-2\alpha_1(W_1)\sigma_1]}{\lambda_2} \times \\ \times \left\{ 2\sqrt{a_{T_2}\tau} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \sigma_1)^2}{4a_{T_2}\tau}\right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{(x - \sigma_1)}{2\sqrt{a_{T_2}\tau}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - \sigma_1}{2\sqrt{a_{T_2}\tau}}\right) \right] + \frac{1}{4\alpha_2(W_2)} \times \right. \\ \times \left[\exp(4\alpha_2^2(W_2)a_{T_2}\tau - 2\alpha_2(W_2)(x - \sigma_1)) \times \right. \\ \times \operatorname{erfc}\left(2\alpha_2(W_2)\sqrt{a_{T_2}\tau} - \frac{x - \sigma_1}{2\sqrt{a_{T_2}\tau}}\right) + \exp[4\alpha_2^2(W_2)a_{T_2}\tau + \\ \left. \left. + 2\alpha_2(W_2)(x - \sigma_1)] \operatorname{erfc}\left[2\alpha_2(W_2)\sqrt{a_{T_2}\tau} + \frac{x - \sigma_1}{2\sqrt{a_{T_2}\tau}}\right] - \right. \\ \left. \left. - 2\exp[-2\alpha_2(W_2)(x - \sigma_1)] \right] \right\}, \quad (12) \end{aligned}$$

где p_{01} — плотность потока падающей на первый слой СВЧ-энергии.

Искомый параметр τ_n определяется из уравнения (12) при подстановке заданных значений

температуры второго слоя T_2 и глубины x , отсчитываемой от поверхности первого слоя.

На рисунке в качестве примера построены рассчитанные по соотношению (4) кривые распределения температуры в кирпичной кладке. Экспериментальные зависимости взяты из работы [8].



Распределение температуры в толще материала при нагреве в лучевой СВЧ-камере на частоте 2450 МГц ($p_0 = 6,2 \cdot 10^4$ кВт/м², $\tau_n = 120$ с).

Материал — кирпичная кладка ($T_n = 19$ °C):

1, 1' — $W = 0,1$ кг/кг; 2, 2' — $W = 0,17$ кг/кг;

1, 2 — расчет; 1', 2' — эксперимент

Предложенная математическая модель и полученные решения позволяют рассчитать временную продолжительность процесса СВЧ-термообработки, предназначенного для уничтожения вредителей в одно- и двухслойных материалах, а также могут быть использованы для расчета температурного и влажностного полей в процессах СВЧ-нагрева и сушки различного назначения.

Литература

1. СВЧ-энергетика/Под ред. Э. Окресса. — М.: Мир, 1971. Т. 2.
2. Архангельский Ю. С. СВЧ-электротермия. — Саратов: Изд-во Саратовского гос. техн. ун-та, 1998.
3. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. — М.: Энергия, 1968.
4. Рикенглаз Л. Э. К теории нагрева диэлектриков мощными электромагнитными полями//Инж.-физич. журн., 1971. Т. 27. № 6. С. 1061—1068.
5. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1956.
6. Марков А. В., Юленец Ю. П. Механизм массопереноса в высокointенсивных процессах сушки при наличии внутренних источников тепла//Теор. основы химич. технологии. 2002. Т. 36. № 3. С. 268—274.
7. Диденко А. Н., Зверев Б. В. СВЧ-энергетика. — М.: Наука, 2000.
8. Бубнов А. В., Кашикет В. В., Марков А. В. Термообработка материалов в СВЧ-поле плоской ЭМ-волны/СПб — гос. технол. ин-т: СПб, 2003. 18с. Деп. в ВИНТИ. 09.04.03, № 653-B2003.

A mathematical model of microwave heat treatment process of moist materials

A. V. Markov

Saint-Petersburg Institute of Production Engineering (Technical university),
Saint-Petersburg, Russia

In regard to boring insect neutralization process in moist materials, acted with the help of microwave ray apparatus, there's considered a mathematical model. Model describes temperature and moisture distribution in single-layer and double-layer building materials with the internal heat source included. The equations and solutions to temperature and moisture distribution through material thickness for two stages of microwave heat treatment process are given: the first being marked as "phase transfer temperature is not achieved" and the second as "phase transfer temperature is still achieved". In addition, there're proposed the expressions to calculate the time-value up to that a given temperature at given material's depth is being achieved, i.e. the main parameter of boring insect neutralization process.

УДК 621.039.335

Получение изотопов ртути фотохимическим методом

Ю. В. Вязовецкий

Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

В РНЦ "Курчатовский институт" созданы экспериментальная установка и технологии, использующиеся для выделения высокообогащенных изотопов ртути фотохимическим методом с применением реакции окисления селективно возбужденных атомов ртути в присутствии бутадиена-1,3. В результате изучения влияния различных факторов, в том числе режимов работы источников света, на селективность процесса обогащения, на автоматической установке были получены изотопы Hg-196, Hg-198, Hg-199, Hg-200, Hg-202 различных концентраций.

На российском и мировом рынках имеется устойчивый спрос на изотопы ртути, интерес к которым первоначально был связан с использованием их в медицине для диагностики некоторых заболеваний, а затем — и для изучения возможности применения ртути, обогащенной до 2—4 % изотопом Hg-196 в источниках света для увеличения их светоотдачи [1]. В настоящее время значительно возросло потребление изотопов Hg-198, Hg-200, Hg-202, которые используются в ряде стран для изучения проблем, связанных с загрязнением экологических систем промышленными отходами ртути и ее соединениями [2, 3], а также в спектроскопии, геологии и т. п.

Разделение изотопов ртути может быть осуществлено различными методами, например, электромагнитным или центробежным. Однако в последние годы наиболее интенсивно развивались методы получения изотопов ртути, связанные с использованием фотохимических процессов, которыми принято называть процессы, основанные на химических реакциях возбужденных атомов. Фотохимическая технология по-

лучения изотопов ртути заняла особое место среди других технологий благодаря своей эффективности при получении значительных количеств изотопов средних концентраций, а также высокообогащенных изотопов.

Впервые ртуть, обогащенная изотопом Hg-196, была получена французскими исследователями в 1968 г. [4]. Созданная ими экспериментальная установка позволяла получать обогащенный до нескольких процентов изотоп Hg-196 с производительностью менее 0,1 мг/ч. В этих работах были измерены некоторые основные константы, характеризующие этот процесс. Позже были опубликованы работы немецких ученых, в которых также изучался процесс получения изотопа Hg-196 с использованием фотохимической реакции окисления ртути в присутствии бутадиена-1,3 C_4H_6 [5, 6]. Однако несмотря на значительные результаты, полученные в лабораторных условиях, можно назвать очень мало примеров успешного внедрения фотохимических процессов в промышленных масштабах. Одним из таких примеров является создание в РНЦ "Курчатовский институт" промышленной технологии