

УДК 621.365.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

С. В. Тригорлый

Саратовский государственный технический университет, 410054 Саратов

Проведено численное моделирование процессов электродинамики, тепломассопереноса и термомеханики при воздействии на диэлектрик энергии СВЧ. Предложено решение задач оптимизации термообработки материалов в СВЧ-установках, использующих камеры лучевого типа.

Сверхвысокочастотная (СВЧ) термообработка диэлектрических материалов находит применение в различных отраслях благодаря высокой концентрации энергии и быстрому объемному нагреву, а также возможности получения необходимого распределения источников тепла и поля температур в нагреваемом объекте [1]. Наряду с традиционным использованием СВЧ-энергии для нагрева, сушки, размораживания заметно повысился интерес к применению сверхвысоких частот в высокотемпературных технологиях, например при производстве огнеупорных и теплоизоляционных материалов, спекании и обжиге керамики, термоупрочнении грунтовых блоков [2]. Многие из этих процессов сопровождаются фазовыми переходами, появлением больших температурных напряжений и деформаций. Поэтому актуальной проблемой является разработка адекватных математических моделей, наиболее полно отражающих физические процессы в диэлектрике при воздействии СВЧ-энергии. На основе таких моделей возможно решение задач управления технологическими процессами и создания оптимальных СВЧ-установок.

Применение СВЧ-установок с камерами лучевого типа позволяет проводить термообработку объектов различных габаритов, обеспечивая большую мощность, равномерность нагрева и работу в периодическом и методическом режимах. К таким камерам относят камеры с ограниченным и неограниченным объемом, когда их размеры значительно превышают длину волны [1]. В качестве излучателей обычно используются антенны рупорного или щелевого типа.

Рассмотрим сначала процессы СВЧ-термообработки, которые могут происходить в установках любого типа. При помещении диэлектрика в поле СВЧ вследствие диэлектрических потерь увеличивается температура объекта, появляются температурные деформации и напряжения, могут происходить процессы массопереноса вещества. Сформулируем математическое описание этих процессов с учетом перечисленных ниже допущений.

Для большого класса веществ, исключая ферромагнетики и сегнетоэлектрики, электрофизические свойства не зависят от напряженности электрического E и магнитного H полей. С учетом этого для изотропной среды материальные уравнения записываются в виде

$$D = \varepsilon E, \quad B = \mu H, \quad j = \gamma E,$$

где D , B — векторы электрической и магнитной индукции; ε , μ — абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды; γ — электрическая проводимость; j — плотность тока проводимости.

Предполагаем, что сторонние токи и объемные заряды отсутствуют, а среда имеет однородную капиллярно-пористую структуру, в которой не происходит химических превращений. Вслед за [3, 4] принимаем допущение о постоянстве теплофизических и механических свойств, а также линейной зависимости между механическими напряжениями и деформациями в узком диапазоне температур и времени.

В этом случае процессы СВЧ-термообработки диэлектриков описываются следующими уравнениями:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \tau}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \tau}, \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = k_{11} \nabla^2 T + k_{12} \nabla^2 W + k_{13} \nabla^2 p + \frac{q_v}{c\rho} - \frac{(3l + 2m)\alpha T_0}{\lambda} \cdot \operatorname{div} \mathbf{u}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + \mathbf{v} \cdot \nabla W = k_{21} \nabla^2 T + k_{22} \nabla^2 W + k_{23} \nabla^2 p, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \mathbf{v} \cdot \nabla p = k_{31} \nabla^2 T + k_{32} \nabla^2 W + k_{33} \nabla^2 p;$$

$$m \nabla^2 \mathbf{u} + (l + m) \cdot \operatorname{grad} (\operatorname{div} \mathbf{u}) + \mathbf{X} - (3l + 2m)\alpha \operatorname{grad} (T - T_0) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \tau^2}; \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = 2me_{ij} + [le_{ij} - (3l + 2m)\alpha(T - T_0)]\delta_{ij}, \quad e_{ij} = e_{ji} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (5)$$

Уравнения (1) представляют собой уравнения Максвелла, (2), (3) — уравнения тепло-массопереноса, (4), (5) — уравнения термомеханики. Здесь приняты следующие обозначения: T , W , p — функции температуры, влагосодержания и давления; τ — время; \mathbf{u} — вектор перемещений; \mathbf{v} — вектор скорости движения; λ , c , ρ — коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость при постоянном давлении и плотность диэлектрика; $q_v = 0,5\omega\varepsilon_0\varepsilon' \operatorname{tg} \delta |E|^2$ — мощность внутренних источников тепла, обусловленная диэлектрическими потерями в поле СВЧ; ω — круговая частота; ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; ε' — относительная диэлектрическая проницаемость обрабатываемого материала; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; k_{11} , k_{12} , ..., k_{33} — коэффициенты тепло-массопереноса [3]; $l = \nu M / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)]$ — коэффициент Ламе; M , ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона; $m = M / [2(1 + \nu)]$ — модуль сдвига; α — средний коэффициент температурного расширения в интервале температур $[T, T_0]$; \mathbf{X} — вектор объемных сил; σ_{ij} — компоненты тензора механических напряжений ($i, j = 1, 2, 3$); e_{ij} — компоненты тензора деформаций; $u_{ij} = \partial u_i / \partial x_j$ — производные по пространственным координатам; u_i — компоненты вектора перемещений в направлении координат x , y , z , которые обозначены как x_i ($i = 1, 2, 3$); δ_{ij} — символ Кронекера, имеющий значения $\delta_{ij} = 0$ ($i \neq j$), $\delta_{11} = \delta_{22} = \delta_{33} = 1$. Приведенные выше уравнения должны быть дополнены соответствующими начальными и граничными условиями [1, 3, 4].

Как следует из уравнений (1)–(5), электродинамические, тепловые и механические процессы, происходящие в диэлектрике при СВЧ-термообработке, взаимосвязаны. Например, при СВЧ-сушке нестационарные поля температур и давлений приводят к появлению деформаций и температурных напряжений. В то же время деформации вызывают обратный эффект — изменение температуры объекта (2). Деформации оказывают влияние и на процесс распространения электромагнитных волн, что объясняется следующими причинами. Из-за температурных деформаций изменяется пространственное расположение границ диэлектрика. Если его размеры и длина волны соизмеримы, то деформации приводят к изменению напряженности электрического поля вследствие изменения фазовых соотношений при сложении, например, падающей и отраженной волн.

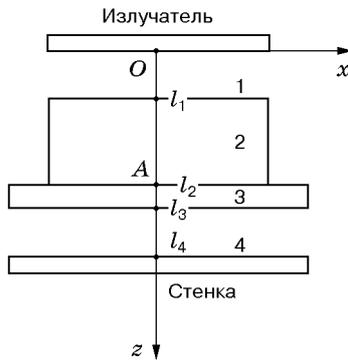


Рис. 1. Распространение электромагнитной волны в многослойной среде:
1, 4 — воздух; 2 — диэлектрик; 3 — транспортирующая лента

Связанность рассматриваемых процессов обусловлена также тем, что механические, электро- и теплофизические свойства диэлектриков могут зависеть от температуры и влажности.

Уравнения (1)–(5) могут упрощаться в зависимости от конструкции СВЧ-установки и вида технологического процесса. Рассмотрим методы решения этих уравнений применительно к процессам термообработки диэлектриков в СВЧ-камере лучевого типа (рис. 1). Предположим, что обрабатываемый диэлектрик находится на транспортирующей ленте, выполненной из радиопрозрачного материала. Между диэлектриком и СВЧ-излучателем, а также между транспортирующей лентой и металлической стенкой камеры имеется воздушный промежуток или иная диэлектрическая среда. Таким образом, электродинамическая задача сводится к моделированию процесса распространения электромагнитной волны в многослойной диэлектрической среде.

Для решения данной задачи используем упрощение о нормальном падении волны на поверхность объекта термообработки [1]. Тогда на основе уравнений Максвелла для случая гармонических колебаний запишем волновое уравнение, справедливое для каждого слоя диэлектрической среды:

$$\frac{d^2 E_n}{dz^2} = k_n^2 E_n, \quad (6)$$

где E_n — комплексная функция напряженности электрического поля в слое с номером n ; z — координата в направлении распространения электромагнитной волны; $k_n = \alpha_n + j\beta_n$ — коэффициент распространения; α_n, β_n — коэффициент затухания и волновое число, зависящие от электрофизических свойств ε'_n и $\operatorname{tg} \delta_n$. Решение уравнения (6) имеет вид

$$E_n = A_n \exp(-k_n z) + B_n \exp(k_n z).$$

Напряженность магнитного поля в каждом слое равна

$$H_n = \frac{k_n}{j\omega\mu_n\mu_0} [A_n \exp(-k_n z) - B_n \exp(k_n z)].$$

Постоянные интегрирования A_n и B_n определяем из следующих граничных условий:

$$\begin{aligned} E_0 &= A_1 + B_1 & \text{при } z &= 0, \\ E_{n-1} &= E_n, \quad H_{n-1} = H_n & (n = 2, \dots, N-1) & \text{при } z = l_n, \\ E_n &= 0 & \text{при } z &= l_N, \end{aligned}$$

где E_0 — напряженность электрического поля в плоскости апертуры антенны; N — количество диэлектрических слоев. Обычно известна не E_0 , а плотность мощности, излучаемая

антенной: $p_0 = 0,5 \operatorname{Re}(E_0 \bar{H}_0)$, где \bar{H}_0 — комплексно-сопряженная величина напряженности магнитного поля при $z = 0$. Это соотношение вместе с граничными условиями используется для расчета постоянных A_n , B_n и определения распределений $E(z)$ и $q_v(z)$. Функция $q_v(z)$ необходима для решения задачи тепломассопереноса.

Рассмотрим задачу тепломассопереноса для процессов СВЧ-сушки материалов при температуре ниже 373 К, когда избыточного давления паров не возникает. Такой режим используется при термообработке материалов, для которых недопустимо появление значительных внутренних давлений, приводящих к большим деформациям или к их разрушению. В данном случае уравнения тепломассопереноса (2), (3) при неподвижном обрабатываемом диэлектрике принимают вид

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = a_w \nabla^2 W + a_w \varphi \nabla^2 T, \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + b \frac{L}{c} \frac{\partial W}{\partial \tau} + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (7)$$

где a — коэффициент температуропроводности; b — коэффициент внутреннего испарения влаги; L — теплота парообразования; a_w — коэффициент диффузии влаги; φ — относительный коэффициент термодиффузии. Начальная температура и влагосодержание однородны по всему объему: $T = T_0$, $W = W_0$ при $\tau = 0$. Граничные условия на наружной поверхности объекта имеют вид

$$a_w \nabla W + h_w (W - W_-) = 0, \quad \lambda \nabla T + h (T - T_-) = 0, \quad (8)$$

где h_w , h — коэффициенты массо- и теплоотдачи; W_- , T_- — влагосодержание и температура окружающей среды.

Для решения задачи тепломассопереноса используем метод конечных элементов (МКЭ), в соответствии с которым решение уравнений (7) при граничных условиях (8) эквивалентно нахождению минимума функционалов:

$$\chi_1 = \int_V \left\{ \frac{a_w [\operatorname{grad} W]^2}{2} - \left[-\frac{a_w \varphi}{\lambda} q_v - \left(1 + \frac{a_w \varphi}{\lambda} b \rho L\right) \frac{\partial W}{\partial \tau} + \frac{a_w \varphi}{\lambda} c \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} \right] W \right\} dV + \int_S \frac{h_w}{2} (W - W_-)^2 dS; \quad (9)$$

$$\chi_2 = \int_V \left\{ \frac{\lambda [\operatorname{grad} T]^2}{2} - \left[q_v - c \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} + b \rho L \frac{\partial W}{\partial \tau} \right] T \right\} dV + \int_S \frac{h}{2} (T - T_-)^2 dS. \quad (10)$$

Здесь V , S — объем тела и его наружная поверхность. Функционал (9) учитывает перенос влаги как за счет концентрационной диффузии, так и за счет термодиффузии. Предполагаем, что температура и влагосодержание в пределах каждого элемента, на которые разбивается область V , линейно зависят от координат.

Выразив функционалы (9) и (10) через температуру и влагосодержание в узлах, проведя их минимизацию и применив для решения центральную разностную схему [5], получаем системы алгебраических уравнений относительно влагосодержания и температуры в узлах. Запишем эти уравнения в матричной форме:

$$([K_{11}] + 2d[C_{22}]/\Delta\tau)\{W\}_+ = 2d[C_{22}]\{W\}_i/\Delta\tau + (\{F_1\}_+ + a_w \varphi \{F_2\}_+/\lambda - a_w \varphi [K_{22}]\{T\}_+/\lambda); \quad (11)$$

$$([K_{22}] + 2[C_{22}]/(g\Delta\tau))\{T\}_+ = 2[C_{22}]\{T\}_i/(g\Delta\tau) + (\{F_2\}_+ + b\rho L\{F_1\}_+/g - b\rho L[K_{11}]\{W\}_+/g), \quad (12)$$

где $\{T\}_+ = 0,5(\{T\}_{i+1} - \{T\}_i)$, $\{W\}_+ = 0,5(\{W\}_{i+1} - \{W\}_i)$, i — номер шага по времени; $\{F_1\}_+$, $\{F_2\}_+$ — средние векторы нагрузок за интервал времени $\Delta\tau$; $\{W\}_+$, $\{T\}_+$ — искомые векторы влагосодержания и температуры в узлах для середины интервала $\Delta\tau$; $[K_{11}]$, $[K_{22}]$, $[C_{11}]$, $[C_{22}]$ — коэффициенты матричных уравнений, полученные в результате минимизации функционалов (9), (10); $g = 1 + a_w\varphi b\rho L/\lambda$; $d = (1 + a_w\varphi b\rho L/\lambda - a_w\varphi/\lambda)/(c\rho)$.

Системы (11), (12) решаются последовательными приближениями. На каждом шаге по времени сначала не учитывается термодиффузия влаги ($\varphi = 0$). При этом уравнение (11) становится независимым от (12). Это дает возможность определить влагосодержание в узлах $\{W\}_+$ из (11), а затем найти температуру в узлах $\{T\}_+$ по $\{W\}_+$ и начальным температурам $\{T\}_i$. На следующей итерации вновь решаются системы (11), (12), но в (11) температура в узлах $\{T\}_+$ становится известной из предыдущей итерации, что позволяет учесть термодиффузию. По достижении заданной точности расчета влагосодержаний итерации завершаются. Аналогичная процедура выполняется для следующих шагов $\Delta\tau$.

Полученное в результате моделирования поле температур используется при решении задачи термоупругости, которая рассматривается в квазистационарном приближении. В соответствии с МКЭ, который также применяется на данном этапе моделирования, необходимо минимизировать полную потенциальную энергию в рассматриваемой области [6]:

$$\Pi = \sum_{e=1}^m \left[\int_{V^{(e)}} 0,5\{U\}^T [G^{(e)}]^T [M^{(e)}] [G^{(e)}] \{U\} dV - \int_{V^{(e)}} \{U\}^T [G^{(e)}]^T [M^{(e)}] \{r^{(e)}\} dV \right], \quad (13)$$

где $V^{(e)}$ — область, занимаемая отдельным элементом; m — число элементов; $\{U\}$ — вектор узловых перемещений; $[G^{(e)}]$ и $[M^{(e)}]$ — матрицы градиентов и упругих характеристик; $\{r^{(e)}\}$ — вектор деформаций, связанный с тепловым расширением материала диэлектрика.

Из условия минимума (13) получаем систему алгебраических уравнений относительно узловых перемещений, которая решается методом Гаусса. По найденным узловым перемещениям вычисляются деформации и температурные напряжения с помощью соотношений (5).

Общий подход к моделированию взаимосвязанных процессов СВЧ-термообработки материалов, когда физические свойства изменяются во времени, заключается в следующем. Время термообработки разбивается на такие интервалы, в пределах которых физические свойства можно считать постоянными, а разностную схему — устойчивой [6]. На каждом шаге $\Delta\tau$ последовательно решаются задачи электродинамики, тепломассопереноса и термоупругости. По результатам расчета устанавливаются физические свойства материала для следующего шага $\Delta\tau$, и процедура повторяется до момента окончания процесса.

Предложенные математические модели используются при решении задач управления и оптимизации технологическими СВЧ-процессами и установками лучевого типа. Одной из основных задач управления процессами СВЧ-термообработки является перевод объекта из начального состояния в заданное. Состояние объекта в зависимости от технологических особенностей характеризуется температурой, влагосодержанием, температурными напряжениями, деформациями и другими параметрами.

При переводе системы из начального состояния $Q(M)$ в заданное Q_+ используем следующие критерии оптимальности [7]:

- точность перевода к заданному моменту времени $J = \max_D |Q(M, \tau_+, q) - Q_+| \leq \psi$;
- быстрдействие перевода $J = \max_D |Q(M, \tau, q) - Q_+| \leq \psi, \tau \rightarrow \min$.

Здесь M — точка, принадлежащая рассматриваемой области D ; τ — заданное время; q — управляющая функция, зависящая от вида управляющего воздействия; ψ — максимально допустимое отклонение от заданного состояния.

Данные задачи решаются при ограничениях, обусловленных технологическими требованиями и особенностями СВЧ-установки. Основными ограничениями для процессов термообработки диэлектриков в СВЧ-камерах лучевого типа являются: максимальная температура объекта $\max T(M, \tau, q) \leq T_*$, где T_* — допустимая температура нагрева; наибольшая величина главных или максимальных касательных напряжений (в зависимости от механических свойств материала) $\max \sigma(M, \tau, q) \leq \sigma_*$; влагосодержание $W_- \leq W \leq W_+$; температура окружающей среды $T_- \leq T_0 \leq T_+$; скорость нагрева материала $\partial T / \partial \tau \leq \Theta$; мощность СВЧ-генератора $P_- \leq P \leq P_+$; потребление СВЧ-энергии за время управления

$\int_0^{\tau_+} P(\tau) d\tau \leq P_*$, где P_* — максимально допустимое потребление электроэнергии; положение,

занимаемое центром перемещающейся антенны $S(\tau)$ над обрабатываемой поверхностью F : $S(\tau) \in F$; скорость движения антенны $V_- \leq V(\tau) \leq V_+$; коэффициент стоячей волны, определяющий степень согласования СВЧ-камеры с линией передачи $1 \leq K \leq K_*$.

Одной из важных задач управления является получение необходимого распределения поля температур за счет создания соответствующего распределения внутренних источников тепла в объеме тела.

В данной работе исследованы возможности управления внутренними источниками тепла при СВЧ-нагреве древесной плиты из бука в камере лучевого типа (рис. 1). В качестве управляющего параметра рассматривалось расстояние Δl между объектом нагрева и металлической отражающей стенкой.

Расчеты выполнялись при следующих исходных данных: толщина плиты $\Delta L = 5$ см; средняя плотность СВЧ-мощности $p_0 = 3$ Вт/см²; частота $f = 2450$ МГц; начальная температура плиты $T_0 = 293$ К; $\lambda = 1,15$ Вт/(м·К); $c = 1717$ Дж/(кг·К); $\rho = 1560$ кг/м³; $\varepsilon' = 3,4$; $\operatorname{tg} \delta = 0,17$; температура окружающего воздуха $T_+ = 293$ К.

Предполагалось, что длина плиты вдоль оси Oy значительно превосходит ее поперечное сечение, а мощность внутренних источников тепла в этом направлении распределена равномерно. Поэтому теплообменом по оси Oy пренебрегали и рассматривали двумерную задачу теплопроводности для поперечного сечения плиты (рис. 1). Толщина транспортирующей ленты невелика и имеет пренебрежимо малое термическое сопротивление. Поэтому на всей наружной поверхности задавались граничные условия третьего рода. Коэффициент теплоотдачи определялся с учетом конвекции и излучения.

Установлено, что распределение $q_v(z)$ имеет вид стоячей волны, положение минимумов и максимумов которой существенно зависит от расстояния Δl между плитой и металлической стенкой (рис. 2). Аналогичный характер имеет и распределение температур $T(z)$. При $\Delta l = 5$ см максимумы $q_v(z)$ и $T(z)$ находятся в середине пластины, а минимумы — на расстоянии $z = 1$ см и $z = 4$ см. После 3 мин нагрева максимальная температура составляет 378 К, а минимальные — 303 и 312 К.

При $\Delta l = 1$ см распределение $q_v(z)$ и $T(z)$ иное: максимумы температур составляют 356 К при $z = 1$ см и 347 К при $z = 4$ см, а минимум — 306 К при $z = 2,5$ см. Управляя распределением температур за счет изменения расстояния Δl , можно интенсифицировать технологические процессы. Например, при СВЧ-сушке получение максимума температур в середине объекта способствует более быстрому удалению влаги [3]. Для получения равномерного нагрева по всему объему объекта можно периодически изменять положение металлической стенки, перемещая тем самым максимум интенсивности по толщине материала.

Важной задачей термообработки диэлектрических материалов является определение оптимальных режимов СВЧ-нагрева, при которых температурные напряжения не превышают предельно допустимых значений. Эта задача решалась для случая высокотем-

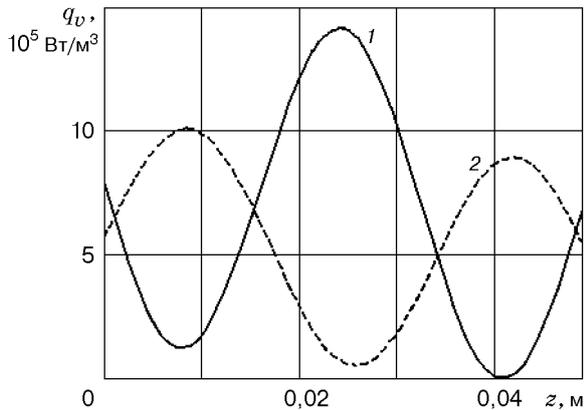


Рис. 2

Рис. 2. Распределение мощности внутренних источников тепла по толщине древесины при $\tau = 3$ мин:

1 — $\Delta l = 5$ см; 2 — $\Delta l = 1$ см

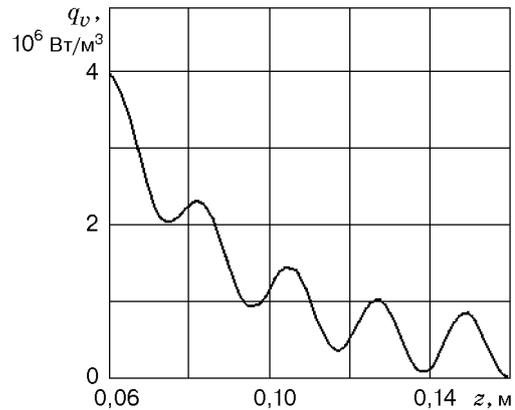


Рис. 3

Рис. 3. Распределение мощности внутренних источников тепла по толщине плиты при $x = 0$

пературной термообработки строительных конструкций хранилищ вредных химических веществ с целью их обеззараживания. Моделировался процесс термообработки плоской бетонной плиты толщиной 10 см при воздействии неподвижного СВЧ-излучателя.

Необходимо было решить следующую задачу оптимизации: определить мощность СВЧ-генератора, работающего на частоте 2450 МГц, при которой максимальная температура достигает величины $T_* = 690$ К за время $\tau = 1$ мин, а максимальная величина главных температурных напряжений не превышает 48 МПа.

Моделирование проводилось при следующих условиях. СВЧ-излучатель имел гауссово распределение мощности внутренних источников тепла с центром, совпадающим с серединой поперечного сечения плиты. По длине плиты мощность внутренних источников тепла распределялась равномерно. Расстояние между излучателем и плитой, а также между плитой и отражающей металлической стенкой равно 6 см. На наружной поверхности плиты выполнялись граничные условия третьего рода.

Задача термоупругости решалась для случая плоской деформации поперечного сечения плиты при условии нулевых перемещений средних точек плиты в направлении оси Ox и жесткого закрепления точки A (см. рис. 1).

Результаты моделирования представлены на рис. 3–5. В силу симметрии полей температур и механических напряжений относительно середины сечения плиты на рис. 4, 5 показаны распределения температур и напряжений только для половины плиты. Затухание мощности по глубине плиты имеет ярко выраженный характер (см. рис. 3). Это объясняется тем, что толщина плиты превышает глубину проникновения электромагнитной волны в бетон ($\Delta = 6,9$ см). Поэтому удаленные от излучателя слои бетона нагреваются незначительно.

Установлено, что оптимальная мощность СВЧ-генератора для времени термообработки $\tau = 45$ с равна 2,5 кВт. При этом максимальная температура составила 691 К, а главные напряжения $\sigma = 44,8$ МПа меньше $\sigma_* = 48$ МПа. Для получения более равномерного поля температур можно рекомендовать двусторонний СВЧ-нагрев от нескольких излучателей.

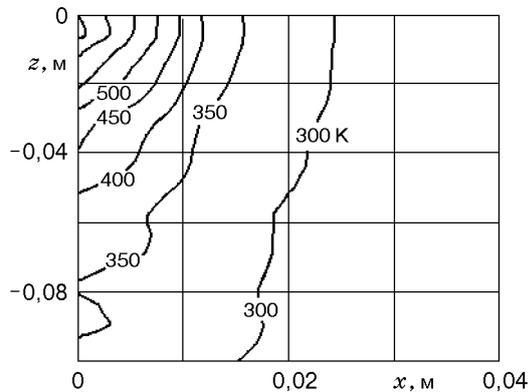


Рис. 4

Рис. 4. Изотермы в бетонной плите для момента времени $\tau = 45$ с

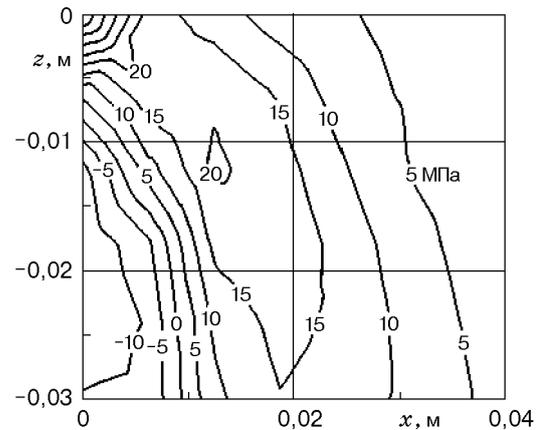


Рис. 5

Рис. 5. Распределение наибольших главных напряжений в верхнем слое бетонной плиты для момента времени $\tau = 45$ с

Таким образом, использование предложенной численной методики моделирования процессов электродинамики, тепломассопереноса и термомеханики позволяет решать задачи управления и оптимизации применительно к условиям термообработки диэлектриков в СВЧ-установках лучевого типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю. С., Девяткин И. И.** Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983.
2. **Современные проблемы применения СВЧ-энергии:** Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Саратов, 14–15 июня 1993 г. Саратов: Саратов. техн. ун-т, 1993.
3. **Лыков А. В.** Теория сушки. М.: Энергия, 1968.
4. **Коваленко А. Д.** Основы термоупругости. Киев: Наук. думка, 1970.
5. **Архангельский Ю. С., Тригорлый С. В., Грушина Л. В.** Численное исследование процессов тепломассообмена в объектах при нагреве в поле СВЧ // Изв. вузов СНГ. Энергетика. 1997. № 3/4. С. 66–71.
6. **Тригорлый С. В.** Задача термоупругости бетонной плиты при сверхвысокочастотном нагреве // Изв. вузов. Стр-во. 1998. № 1. С. 30–35.
7. **Чубаров Е. П.** Управление системами с подвижными источниками воздействия. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Поступила в редакцию 18/VIII 1998 г.