УДК 621.565.93/.95:637.521.3(045)(476)

Ж.Д. Жайлаубаев, к.т.н.
Семейский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт переработки сельскохозяйственной продукции»

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИРА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ДВИЖЕНИИ СРЕДЫ В АППАРАТЕ

При деформировании твердых дисперсных тел в процессах термообработки в теле возникают внутренние напряжения, вызывающие деформации сжатия и деформации сдвига. Внутренние напряжения создаются внешними силами и изменениями температуры, влагосодержания и общего давления в объеме тела в процессе нагрева пищевых продуктов. Полученная замкнутая система уравнений описывает нестационарные градиентные поля температуры, влагосодержания, избыточного давления и упругопластических деформаций, а уравнения характеризуют напряжено-деформированное состояние материала в процессе термообработки тепломассообменных аппаратах в производстве переработки пищевых продуктов.

При усилии деформирования твердых дисперсных тел в процессах термообработки в теле возникают внутренние напряжения, вызывающие деформации сжатия и деформации сдвига. Внутренние напряжения создаются внешними силами и изменениями температуры, влагосодержания и общего давления в объеме тела в процессе сушки, варки, нагрева пищевых продуктов.

Полагая влажное тело изотропным, независимые компоненты тензора напряжений можно выразить тремя инвариантами: $\sum_1 \sigma_{kk}, \sum_2 \sigma_y \tau_y, \sum_3 \det(\sigma_y)$ и представить термодинамический потенциал как функцию $\partial(\Sigma_1, \Sigma_2, T, \omega)$. Разложим Ф в ряд Тейлора только по степеням σ_{ij} полагая коэффициенты зависящими от температуры и влагосодержания. Для малых деформация можно учесть влияние температуры, влагосодержания и общего давления при линейном соотношении между тензором деформаций и тензором напряжений. При этом условии достаточно сохранить в разложении Ф члены ряда не выше второго порядка малости относительно σ_{ij}.

$$\mathcal{F}\left(\sum_1,\sum_2,T,\omega\right)=\mathcal{F}_0+\frac{\partial\mathcal{F}_0}{\partial\sum_1}\sum_1\;+\frac{\partial\mathcal{F}}{\partial\sum_2}\sum_2\;+\frac{\partial^2\mathcal{F}_0}{\partial\sum_1^2}\frac{\sum_1^2}{2}, \qquad (2)$$

где $\Phi(0,0,T,w)$ – термодинамический потенциал единицы объема при отсутствии напряжений.

Обобщая представления теории термоупругости /1/ на случай массотермической упругопластичности при сушке, вместо (2) получаем выражение термодинамического потенциала в явном виде:

$$\mathcal{F}=-\frac{1}{2}\frac{\sigma_{ij}^2}{2G(1-\omega)}+\frac{1}{6}\frac{1}{2G(1-\omega)}\sigma_{kk}^2-\sigma_{kk}\left(\alpha_T\vartheta+\beta_\omega\eta+\frac{1}{E_0}p\right)+\int_{T_0}^{T}dT\int_{T_0}^{T}\frac{p_0c_{\omega,\sigma=0}}{T}dT \qquad (3)$$

где ϑ, η, ρ – изменения соответственно температуры ($\vartheta=T-T_0$), влагосодержания ($\eta=\omega-\omega_o$), общего давления ($p=P–P_0$).

На основании уравнения (1) и (3) находим равные выражения энтропии, химического потенциала поглощенной влаги и соотношение между тензором деформаций и тензором напряжений:

$$\begin{aligned}S=&\frac{\sigma_{ij}^2}{2}\frac{\partial}{\partial T}\left[\frac{1}{2G(1-\omega)}\right]+-\frac{\sigma_{kk}^2}{6}\frac{\partial}{\partial T}\left[\frac{1}{2G(1-\omega)}-\frac{1}{E_0}\right]+\\ &\sigma_{kk}\frac{\partial}{\partial T}\left(\alpha_T\vartheta+\beta_\omega\eta+\frac{1}{E_0}p\right)+\int_{T_0}^{T}\frac{\rho_0c_{\omega,\sigma=0}}{T}dT,\end{aligned} \qquad (4)$$

$$\begin{aligned}\rho_0\mu=&\frac{\sigma_{ij}^2}{2}\frac{\partial}{\partial\omega}\left[\frac{1}{2G(1-\omega)}\right]+-\frac{\sigma_{kk}^2}{6}\frac{\partial}{\partial\omega}\left[\frac{1}{2G(1-\omega)}-\frac{1}{E_0}\right]+\\ &\sigma_{kk}\frac{\partial}{\partial\omega}\left(\alpha_T\vartheta+\beta_\omega\eta+\frac{1}{E_0}p\right),\end{aligned} \qquad (5)$$

$$\varepsilon_{ij}=\frac{\sigma_{ij}}{2G(1-\omega)}-\frac{1}{3}\left[\frac{1}{2G(1-\omega)}-\frac{1}{E_0}\right]+\sigma_{kk}\delta_{ij}\left(\alpha_T\vartheta+\beta_\omega\eta+\frac{1}{E_0}p\right)\delta_{ij}, \qquad (6)$$

где ω – определяемая экспериментально функция обобщенной деформации /2/, равная нулю в области упругих деформаций.

Для систем, в которых протекают необходимые процессы деформирования, тепломассопереноса и фазовых превращений, уравнение баланса энтропии в энергетическом представлении имеет вид /3/

$$T\frac{\partial S}{\partial\tau}=-djvj_q-\mu\frac{\partial p}{\partial\tau}+I_q \qquad (7)$$

После преобразований (7) с помощью выражений (4) и (5) и значений

$$\overline{j_q} = -\lambda_q gradT, \qquad \frac{\partial p}{\partial \tau} = p_0 \frac{\partial \omega}{\partial \tau}$$

находим уравнение теплопроводности высушиваемого нагретого тела

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \gamma div(a_q gradT) + (\gamma - 1)\frac{\beta_\omega}{\alpha_T}\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \frac{\gamma - 1}{\alpha_T E_0}\frac{\partial p}{\partial \tau} - \frac{\gamma - 1}{3d_T} div \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{I_q^*}{p_0 c_{\omega,\varepsilon=0}}$$

Уравнение (8) получено в линейном приближении относительно деформаций и управлением движения деформируемого при сушке нагретого тела /4/

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = div\left(a_m grad\omega + a_m \delta gradT + \frac{k_p}{p_0} gradp \right), \qquad (9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = div(a_m gradp) - \frac{\varepsilon_\omega \partial \omega}{C_B \partial T}, \qquad (10)$$

и уравнение движения деформируемого при сушке нагретого тела /2/

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \tau} + F_1 - p\frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} = 0 \qquad (i, j = 1, 2, 3) \qquad (11)$$

Представим уравнение (11) в перемещениях части u_i. Для этого из (6) получим соотношение между σ_{ij} и ε_{ij}

$$\sigma_{ij} = 2G(1-\omega)\varepsilon_{ij} + \frac{1}{3}\left[E_0 - 2G(1-\omega)\right]E_{kk}\delta_{ij} - \left(\alpha_T \vartheta + \beta_m \eta + \frac{1}{E_0} p \right)\delta_{ij} \qquad (12)$$

и с помощью формул

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial Uj}{\partial x_i} \right), \qquad (13)$$

соотношений (12) заменим в (11) компоненты тензора σ_{ij} компонентами вектора перемещений U_i. После преобразования запишем уравнение движения в векторной форме

$$\sigma_{ij} = 2G(1-\omega)\nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{3}\left[E_0 - G(1-\omega)\right] graddiv\vec{u} + 2gradG(1-\omega)\ddot{I}_\varepsilon +$$

$$\frac{1}{3} grad\left[E_0 - 2G(1-\omega)\right] div\vec{u} - gradE_0\left(\alpha_T \vartheta + \beta_m \eta + \frac{1}{E_0} p \right) + \vec{F} - p\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial \tau^2} = 0$$

(14)

Таким образом, полученная нами замкнутая система уравнений (8)–(10); (14) описывает нестационарные градиентные поля температуры, влагосодержания, избыточного давления и упругопластических деформаций, а уравнения (12) и (13) характеризуют напряжено–деформированное состояние материала в процессе термообработки тепломассообменных аппаратах в производстве переработки пищевых продуктов.

E_{ij} – компоненты тензора деформаций, λ_{ij} – компоненты тензора напряжений, δ_{ij} – символ Кронекера, τ – время, I – мощность распределенных источников тепла, g u g – плотность влажного абсолютно сухого тела, удельная теплоемкость при отсутствии напряжений и при отсутствии деформаций, G – модуль деформации сдвига, E_0 – объемный модуль упругости, средний коэффициент линейного теплового расширения, α – средний коэффициент линейной усадки, отношение удельной теплоемкости тела при отсутствии напряжений к удельной теплоемкости при отсутствии деформаций (показатель политропы процесса сушки).

Литература

1. Коваленко, А.Д. Термоупругость / А.Д. Коваленко. – Киев: Вища школа, 1975. – 216 с.
2. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Т.А. Михайлов – М.: Л.Госэнергоиздат, 1963. – 535с.
3. Паттерман, С. Гидродинамика сверхтегучей жидкости / С. Паттерман – М.: Мир, 1978. – 520с.
4. Абраменко, А.Н. Теплообмен при испарении и кипении жидкости в пористых телах / А.Н. Абраменко [и др.] // Инж.физ.журн., 1982, т.42, № 2. – С. 218–227.

Zh. Zhailaubaev

PECULIARITY OF HEAT EXCHANGE IN A FORCED CONVECTION OF FAT IN THE TURBULENT FLOW ENVIRONMENT IN THE APPARATUS

Summary

In the deformation of the solid dispersed bodies during the heat treatment process in the body there are internal stresses that cause deformation of compression and shear deformation. The internal stresses created by external

forces and changes of a temperature, moisture content and the total pressure in the volume of the body in the process of heating food. An obtained closed system of equations describes the time–varying gradient fields of temperature, moisture content, pressure and elastic deformation, and the equations describe the stress strain state of material in heat treatment of heat and mass exchange apparatus in the production of food processing.