

Н.М. Сорокова, д.т.н., с.н.с. (Інститут технічної теплофізики НАНУ)
Ю.Ф. Снєжкін, акад., проф. (Інститут технічної теплофізики НАНУ)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ БЕЗПЕРЕРВНОГО СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ ПОРИСТИХ СИСТЕМ

Для розрахунку процесу сушіння в апаратах безперервної дії зазвичай залучаються наближені балансові методи моделювання кінетики зневоднювання капілярно-пористих матеріалів. В роботі [1] вперше розроблені математична модель та чисельний метод розрахунку динаміки тепломасопереносу, фазових перетворень та усадки при зневодненні консолидованих колоїдних капілярно-пористих матеріалів в конвективних сушарках безперервної дії, що дозволяють визначати поля температур, об'ємних концентрацій та парціальних тисків рідкої, парової і повітряної фаз в тілі та середніх у довільному перетині z каналу значень цих параметрів в сушильному агенті.

В даній роботі побудовано математична модель і метод розрахунку динаміки сушіння дисперсних колоїдних капілярно-пористих матеріалів у стрічковій сушильній установці. Система рівнянь переносу будувється на основі рівняння переносу субстанції W (маси, енергії) [2]

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \operatorname{div}(W\mathbf{w}) = -\operatorname{div} \mathbf{j}_W + I_W - \frac{W}{1 + \varepsilon_V} \left[\frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} + \operatorname{div}(\varepsilon_V \mathbf{w}) \right], \quad (1)$$

де \mathbf{j}_W – густина потоку субстанції W ; I_W – потужність внутрішніх джерел субстанції; \mathbf{w} – швидкість руху субстанції, $\mathbf{w} = \mathbf{w}_L + \mathbf{w}_\psi$, \mathbf{w}_L і \mathbf{w}_ψ – швидкості стрічки та компонентів тіла (рідини $\psi = ж$, пари $\psi = п$, повітря $\psi = в$) відносно його кістяка; ε_V – відносна об'ємна деформація тіла в результаті переносу субстанції W . Функція \mathbf{j}_W включає дифузійну і фільтраційну складові $\mathbf{j}_W = \mathbf{j}_W^d + \mathbf{j}_W^f$. При нормальних умовах режим роботи стрічкової сушарки є сталим: в кожній точці апарата температура і об'ємні концентрації компонентів дисперсного пористого шару з часом не змінюються ($\partial W / \partial t = 0$, $\partial \varepsilon_V / \partial t = 0$), і \mathbf{w}_L є постійною.

Якщо тепломасоперенос в дисперсному шарі відбувається дифузійним шляхом, швидкість $\mathbf{w}_\psi = 0$ і (1) приймає вид

$$\mathbf{w}_L \cdot \nabla W = -\operatorname{div} \mathbf{j}_W + I_W - W(\mathbf{w}_L \cdot \nabla \varepsilon_V) / (1 + \varepsilon_V). \quad (2)$$

Звичайно ширина і довжина стрічки набагато більше висоти шару матеріалу на ній. Вводячі нерухому систему декартових координат так, що вісь x перпендикулярна до робочої поверхні стрічки, а вісь z рівнобіжна вектору \mathbf{w}_L , математична модель дифузійного неперервного сушіння шару дисперсного колоїдного капілярно-пористого тіла

$$w_l \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\text{ж}} \left(\frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial x} + \delta_{\text{ж}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] - I_V - \frac{U_{\text{ж}}}{1 + \varepsilon_V} w_l \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}, \quad (2)$$

$$w_l \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\text{п}} \left(\frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial x} + \delta_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + I_V - \frac{U_{\text{п}}}{1 + \varepsilon_V} w_l \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}, \quad (3)$$

$$w_l \frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\text{в}} \left(\frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial x} + \delta_{\text{в}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] - \frac{U_{\text{в}}}{1 + \varepsilon_V} w_l \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}, \quad (4)$$

$$c_{\text{еф}} w_l \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{\text{еф}} \frac{\partial T}{\partial x}) - \sum c_{\psi} D_{\psi} \left(\frac{\partial U_{\psi}}{\partial x} U_{\psi} + \delta_{\psi} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - L I_V, \quad (5)$$

де $U_{\text{ж}}$, $U_{\text{п}}$, $U_{\text{в}}$ – об’ємні концентрації; $c_{\text{еф}} = c_{\text{т}} \rho_{\text{т}} (1 - \Pi) (1 - \varepsilon_{\text{ш}}) + c_{\text{ж}} U_{\text{ж}} + c_{\text{п}} U_{\text{п}} + c_{\text{в}} U_{\text{в}}$ і $\lambda_{\text{еф}} = \lambda_{\text{т}} (1 - \Pi) (1 - \varepsilon_{\text{ш}}) + \lambda_{\text{ж}} U_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}} + \lambda_{\text{п}} U_{\text{п}} / \rho_{\text{п}} + \lambda_{\text{в}} U_{\text{в}} / \rho_{\text{в}}$ – ефективні теплоємність і теплопровідність дисперсного шару; Π – пористість тіла, $\varepsilon_{\text{ш}}$ – порозність шару; L – теплота випаровування.

Для визначення впливу порозності $\varepsilon_{\text{ш}}$ на шукані функції та інтенсивність випаровування I_V розглядається контрольний об’єм ΔV , що включає одну частинку. Якщо кількість частинок в одиничному об’ємі $n_{\text{ч}}$, то середня величина контрольного об’єму $\Delta V = 1/n_{\text{ч}}$, а середній об’єм частинки $V_{\text{ч}} = \Delta V (1 - \varepsilon_{\text{ш}})$. Середня площа зовнішньої поверхні частинки визначається через її ефективний розм.ір. Інтенсивність фазового переходу в одиничному об’ємі дисперсного шару представляється [3]

$$I_V = \gamma \left[\exp(A / R_{\text{Y}} T) - 1 \right]^{-1} (\varphi_{\text{т}} - \varphi) [S_{\text{ч}} n_{\text{ч}} + (1 - \varepsilon_{\text{ш}}) S], \quad \gamma = \varepsilon \rho_{\text{ж}} \delta^* / 4. \quad (6)$$

де площа поверхні контакту рідкої і парової фаз складається з зовнішньої $S_{\text{ч}}$ і внутрішньої S [1] поверхонь частинки; $\varphi_{\text{т}}(U_{\text{ж}})$, φ – вологість тіла і пари в порах шару; A – енергія активації.

Отримано вирази для розрахунку параметрів сушильного агента в перетині z каналу [2].

1. Сорокова Н.Н., Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф. Математическое моделирование тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки в ленточной сушильной установке. *Актуальные проблемы сушки и термовлажн. обработки материалов в разл. отр. промышл.и АПК*: сб. н. статей Первых межд. Лыковских научных чтений. 2015. С. 63–67.

2. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Математическая модель и метод расчета динамики непрерывной сушки. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2011. Вип. 39, Т. 2. С. 10–16.

3. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса в процессах сорбции и десорбции в гранулированных сорбентах в адсорбере термотрансформатора. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2010. Вип. 37. С. 90–96.