

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ.  
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ

УДК 532.516: 536.24

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СУШКИ КОЛЛОИДНЫХ  
КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ КИПЯЩЕГО СЛОЯ  
MATHEMATICAL MODELING OF COLLOIDAL CAPILLARY-POROUS OBJECTS  
DRYING DYNAMICS IN BOILING BED CONDITIONS

Снежкин Ю.Ф., член-корр., проф., Сорокова Н.Н., канд. техн. наук, с.н.с.  
Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины, Киев  
Snezhkin Y.F., Sorokovaya N.N.

Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Copyright © 2016 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Эффективность работы сушильной установки кипящего слоя зависит от правильного задания времени пребывания в ней высушиваемого материала. Экспериментальное исследование кинетики сушки в условиях интенсивного протекания тепло- и массообменных процессов в частицах малого размера сопряжено с существенными трудностями и перспективным методом исследования является математическое моделирование динамики сушки одиночной пористой частицы в потоке сушильного агента. В статье представляется математическая модель тепло- и массопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел сферической формы в условиях кипящего слоя, на базе которой возможно определять поля температур, объемных концентраций и парциальных давлений жидкой, паровой и воздушной фаз в теле, а также продолжительность сушки в зависимости от температуры, влагосодержания и скорости сушильного агента, геометрических и теплофизических параметров влажного тела. Разработан эффективный численный метод ее реализации на основе явной трехслойной пересчетной разностной схемы Никитенко Н.И. и процедуре расщепления алгоритма по физическим факторам. Проведен расчет динамики и кинетики обезвоживания частиц фрезерного торфа при равномерном их омывании дымовыми газами. Сопоставление результатов численного моделирования с известными экспериментальными данными свидетельствует об адекватности математической модели и возможности ее применения при определении времени пребывания материала в аппаратах и выборе оптимальных режимных параметров процесса.

The efficiency of the fluidized bed dryer depends on the proper task residence time therein of the material to be dried. Experimental study of drying kinetics under conditions of intense heat and mass transfer processes in the particles of small size represents a significant challenge and a promising method of research is mathematical modeling of the dynamics of drying single porous particles in a stream of drying agent. This article introduces the mathematical model of heat and mass transfer, phase changes and the shrinkage on drying of colloidal capillary-porous bodies of spherical form in a fluidized bed, on the basis of which it is possible to determine the fields of temperature, volume concentrations and partial pressures of liquid, steam and air phase in the body and the drying time depending on the temperature, velocity and moisture content of the drying agent, the geometric and thermal parameters of the wet body. The efficient numerical method for its implementation on the basis of an explicit three-layer iterative finite-difference scheme N.I. Nikitenko and the procedure of splitting on physical factors are developed. Calculation of the dynamics and kinetics of dewatering particles of milled peat in their uniform flow around the flue gases are carried out. Comparison of numerical results with experimental data indicates the adequacy of the mathematical model and the possibility of its use in determining the residence time of the material in the apparatus and the choice of optimal regime parameters of the process.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, динамика сушки, сферическая частица, кипящий слой, торф.

**Keywords:** mathematical modelling, dynamic drying, spherical particles, fluidized bed, peat.

Сушка в условиях кипящего слоя самых разнообразных материалов достаточно широко распространена в пищевой и других отраслях промышленности при осуществлении непрерывных технологических процессов. При правильной организации псевдооживленного слоя в нем нет застойных зон, что способствует хорошему взаимодействию частиц материала с сушильным агентом и их интенсивному обезвоживанию. Эффективность

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ.  
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ**

работы сушильной установки кипящего слоя зависит от правильного задания времени пребывания в ней высушиваемого материала. Экспериментальное исследование кинетики сушки в условиях интенсивного протекания тепломассообменных процессов в частицах малого размера часто сопряжено с существенными трудностями. Математическое моделирование динамики тепломассопереноса и фазовых превращений в обезвоживаемой одиночной пористой частице позволит определять время сушки частиц в зависимости от их свойств и размеров и выбирать оптимальные с точки зрения сохранения энергии и качества режимные параметры процесса. Известные математические модели описывают кинетику процесса сушки [1, 2] и основываются на приближенных балансных методах моделирования, требующих значительного объема экспериментальной информации.

Непрерывное вращение частиц в кипящем слое способствует равномерному их омыванию теплоносителем, температура и влагосодержание которого на различных участках по высоте слоя будем полагать неизменными [3]. Частицы диспергированного влажного материала часто имеют форму, приближенную к сферической. Для случая равномерного обдува сферического коллоидного капиллярно-пористого тела сушильным агентом система дифференциальных уравнений переноса энергии и массы компонентов связанного вещества, которая строится на базе уравнения переноса субстанции для деформируемого тела, полученного в [4], без учета термомодифузии компонентов представляется в следующем виде:

$$c_{эф} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + w_{эфr} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{эф} r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) - LI_V \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_{ж}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{жr} U_{ж})}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_{ж} r^2 \frac{\partial U_{ж}}{\partial r} \right) - I_V - \frac{U_{ж}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_{п}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{гр} U_{п})}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_{п} r^2 \frac{\partial U_{п}}{\partial r} \right) + I_V - \frac{U_{п}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_{в}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{гр} U_{в})}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_{в} r^2 \frac{\partial U_{в}}{\partial r} \right) - \frac{U_{в}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} \quad (4)$$

Здесь  $T$  — температура;  $U_{ж}$ ,  $U_{п}$  и  $U_{в}$  — объемные концентрации жидкости, пара и воздуха в теле;  $t$  — время;  $c_{эф}$ ,  $\lambda_{эф}$  — эффективные теплоемкость и теплопроводность тела,  $c_{эф} = c_T U_T + c_{ж} U_{ж} + c_{п} U_{п} + c_{в} U_{в}$ ,  $\lambda_{эф} = \lambda_T U_T / \rho_T + \lambda_{ж} U_{ж} / \rho_{ж} + \lambda_{п} U_{п} / \rho_{п} + \lambda_{в} U_{в} / \rho_{в}$ ;  $I_V$  — интенсивность испарения жидкости в порах тела;  $L$  — удельная теплота испарения;  $\varepsilon_V$  — относительная объемная деформация;  $w_{эфr}$  — эффективная скорость связанного вещества вдоль координаты  $r$ ,  $w_{эфr} = (w_{жr} c_{ж} U_{ж} + w_{пr} c_{п} U_{п} + w_{вр} c_{в} U_{в}) / c_{эф}$ .

Скорости фильтрации жидкой  $w_{ж}$  и газовой фаз  $w_r$  согласно закону Дарси пропорциональны градиентам их давлений:  $w_{\psi} = -K_0 K_{\psi} / \eta_{\psi} \nabla P_{\psi}$ ,  $\psi = ж, г$ . Здесь  $K_0$  — общая проницаемость среды;  $K_{\psi}$  — относительная проницаемость фазы  $\psi$ ;  $\eta_{\psi}$  — динамический коэффициент вязкости фазы  $\psi$ . Давления  $P_{ж}$  и  $P_r$  выражаются через функции  $U_{ж}$ ,  $U_{п}$ ,  $U_{в}$  и  $T$ . Объемные доли скелета  $\Psi_r$ , жидкости  $\Psi_p$  и газа  $\Psi_g$  в пористом теле находятся по выражениям  $\Psi_r = 1 - \Pi$ ,  $\Psi_{ж} = U_{ж} / \rho_{ж}$  и  $\Psi_g = 1 - \Psi_r - \Psi_{ж}$ , где  $\Pi$  — пористость,  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости. Парциальные плотности пара и воздуха  $\rho_{п} = U_{п} / \Psi_r$  и  $\rho_{в} = U_{в} / \Psi_g$ , а парциальные давления  $P_{п} = \rho_{п} R_y T / \mu_{п}$  и  $P_{в} = \rho_{в} R_y T / \mu_{в}$ . Давление газовой смеси будет  $P_r = P_{п} + P_{в}$ . Давление жидкой фазы  $P_{ж} = P_r + P_k$ , где капиллярное давление  $P_k$  определяется [4] как среднее капиллярное давление жидкости. Объем жидкости  $dV(r)$  содержащейся в порах с радиусами от  $r$  до  $r+dr$  в единичном объеме тела пропорционален дифференциальной функции  $F(r)$  распределения пор по размерам и объемной доли  $\theta(r)$  капилляра, занятой жидкостью:  $dV(r) = \theta(r) F(r) dr$ . Тогда среднее значение капиллярного давления в данной точке тела может быть представлено в виде выражения, аналогичного формуле Лапласа

$$P_k = 2\sigma(T) \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{\theta(r)}{r} F(r) dr / \int_{r_{min}}^{r_{max}} \theta(r) F(r) dr = \frac{2\sigma(T)}{r^*} \quad (5)$$

где  $r_{min}$  и  $r_{max}$  — минимальный и максимальный радиусы пор единичного объема.

Коэффициенты диффузии жидкой и газовой фаз в порах тела находятся по формулам:  $D_{ж} = \gamma_{Dж} [\exp(A_D / RT) - 1]^{-1}$ ,  $D_{п} = D_{в} = \gamma_{Dп} T^{3/2} / P_r$ , где  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $A_D$  — энергия активации для процесса диффузии;  $\gamma_{Dж}$ ,  $\gamma_{Dп}$  — диффузионные коэффициенты. Формула Н.И. Никитенко для  $D_{ж}$  [5] в предельных случаях переходит в эмпирическую формулу Аррениуса для твердых тел и в формулу Эйнштейна для жидких сред.

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ.  
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ**

Интенсивность испарения жидкости на внешней границе тела [6] находится как разность потоков испаряющейся жидкости и конденсирующегося пара

$$I = \gamma_c \left\{ \varphi_{\tau} \Big|_{v=0} \left( \exp \left[ A / (RT) \Big|_{v=0} \right] - 1 \right)^{-1} - \varphi_c \left( \exp \left[ A / (RT_c) \right] - 1 \right)^{-1} \right\} \quad (6)$$

Здесь  $\gamma_c$  — коэффициент поверхностного испарения,  $\gamma_c = \varepsilon \rho_{ж} \delta^* / 4$ ;  $\varepsilon$  — коэффициент излучения;  $\delta^*$  — средняя длина диффузионного перескока активизированной частицы в слое жидкости;  $\varphi_{\tau}$  — влажность парогазовой смеси, которой согласно изотерме сорбции отвечает объемная концентрация  $U_{ж}$  в данной точке пористого тела;  $v$  — нормаль к граничной поверхности;  $T_c$  и  $\varphi_c$  — температура и относительная влажность внешней среды;  $A$  — энергия активации. Значение  $\varphi_{\tau}$  может быть определено на базе формулы, полученной [6] для равновесной толщины слоя конденсата  $\delta$  на поверхности твердого тела, находящегося в среде с параметрами  $\varphi$  и  $P_{н}$ :  $\delta = \delta^* \bar{\delta} = \delta^* (1 - \sqrt{1 - P_{н} / P_{н}^*}) = \delta^* (1 - \sqrt{1 - \varphi})$ , где  $\bar{\delta} = \delta / \delta^*$  при  $0 < \delta < \delta^*$  и  $\bar{\delta} = 1$  при  $\delta > \delta^*$ , откуда  $\varphi_{\tau} = \bar{\delta}(2 - \bar{\delta})$ . В расчетах давление насыщения  $P_{н}$  определялся по формуле Никитенко Н.И. [6]:  $P_{н} = N_p \sqrt{T} [\exp(A / RT) - 1]^{-1}$ ,  $N_p = \text{const}$ .

Интенсивность испарения в порах тела находится по формуле, которая следует из (6) при условии локального термодинамического равновесия, в соответствии с которым температуры фаз в каждой точке тела совпадают

$$I_V = \gamma_c [\exp(A / RT) - 1]^{-1} (\varphi_{\tau} - \varphi) S \quad (7)$$

Здесь  $S$  — площадь контакта жидкой и газовой фаз в частично заполненных жидкостью порах единичного объема тела. Для нахождения функции  $S$  получена формула [7]:

$$S = \frac{2\sqrt{1 - \varphi_{\tau}}}{\rho_{ж} \delta^*} \frac{\partial U_{ж}}{\partial \varphi_{\tau}} \quad (8)$$

Производная  $\partial U_{ж} / \partial \varphi_{\tau}$  может быть найдена из уравнения изотермы десорбции. Если изотерма задана в виде  $U_{ж} = U_{\max} \varphi_{\tau}^g$ ,  $g = \text{const}$ , то  $\partial U_{ж} / \partial \varphi_{\tau} = U_{\max} g \varphi_{\tau}^{g-1}$ . Для древесного торфа результаты по равновесной влажности [8] достаточно хорошо описываются уравнением  $U_{ж} = 0,3 U_{\max} (\varphi_{\tau} / (1 - \varphi_{\tau}))^{1/3}$ .

Относительная объемная деформация  $\varepsilon_V$  находится на базе уравнения термоконцентрационного деформирования [7], записанного в сферических координатах, которое, для случая равномерного обдува тела, когда имеет место осевая симметрия деформаций и радиальное перемещение  $u_r$  зависит только от радиуса  $r$ , а перемещения  $u_{\varphi}$ ,  $u_{\theta}$  в направлениях  $\varphi$  и  $\theta$  отсутствуют, представляется в виде

$$2 \frac{d}{dr} \left( G \frac{du_r}{dr} \right) + \frac{d}{dr} \left( G_1 \frac{du_r}{dr} \right) + 2 \frac{d}{dr} \left( \frac{u_r}{r} \right) + \frac{4G}{r} \left( \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r} \right) - \frac{d}{dr} [N(2G + 3G_1)] = 0 \quad (9)$$

где  $G$ ,  $G_1$  — коэффициенты Ляме,  $G = E_y / [2(1 + \nu_{п})]$ ,  $G_1 = E_y \nu_{п} / [(1 - 2\nu_{п})(1 + \nu_{п})]$ ;  $\nu_{п}$  — коэффициент Пуассона;  $E_y$  — модуль упругости;  $N$  — термоконцентрационная функция [5], определяющая изменение удельного объема тела при его свободном расширении, обусловленном процессами теплопроводности, диффузии, фильтрации, фазового и химического превращения,  $N = \beta_T (T - T_0) + \sum_{\psi} \beta_{\psi} (\omega_{\psi} - \omega_{\psi 0})$ , где

$\beta_T = (\partial x / \partial T) / x$  и  $\beta_{\psi} = (\partial x / \partial \omega_{\psi}) / x$  — средние коэффициенты термического и концентрационного расширения в интервалах температуры  $[T, T_0]$  и массовой концентрации компонента  $\psi$   $[\omega_{\psi}, \omega_{\psi 0}]$ . Функция  $\varepsilon_V$  связана с нормальными компонентами  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ ,  $\varepsilon_{\theta\theta}$  тензора деформации  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) соотношением  $\varepsilon_V(t) = [1 + \varepsilon_{rr}(t)][1 + \varepsilon_{\varphi\varphi}(t)][1 + \varepsilon_{\theta\theta}(t)] - 1$ , где  $\varepsilon_{rr} = du_r / dr$ ,  $\varepsilon_{\varphi\varphi} = \varepsilon_{\theta\theta} = u_r / r$ . Если тело является капиллярно-пористым, его усадкой в процессе сушки можно пренебречь и  $\varepsilon_V = 0$ .

Условия теплообмена на границе  $r = 0$  представляют собой условия симметрии полей температуры и объемных концентраций компонентов связанного вещества

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{v=0} = 0, \quad \frac{\partial U_{ж}}{\partial r} \Big|_{v=0} = 0, \quad \frac{\partial U_{п}}{\partial r} \Big|_{v=0} = 0, \quad \frac{\partial U_{в}}{\partial r} \Big|_{v=0} = 0, \quad (10)$$

а на поверхности  $r = R$  имеют место граничные условия третьего рода

$$\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial v} \Big|_{v=R} = \alpha (T_c - T \Big|_{v=R}) - L \gamma_c \left\{ \varphi_{\tau} \Big|_{v=R} \left[ \exp \left( \frac{A}{RT \Big|_{v=R}} \right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_c \left[ \exp \left( \frac{A}{RT_c} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} \quad (11)$$

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ.  
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ**

$$D_{\text{ж}} \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial v} \Big|_{v=0} = \gamma_{\text{с}} \left\{ \left[ \varphi_{\text{т}} \Big|_{v=0} \exp\left(\frac{A}{RT \Big|_{v=0}}\right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_{\text{с}} \left[ \exp\left(\frac{A}{RT_{\text{с}}}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (12)$$

$$-D_{\text{п}} \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial v} \Big|_{v=0} = \gamma_{\text{пс}} (U_{\text{п}} \Big|_{v=0} - \rho_{\text{пс}} \Psi_{\text{п}}), \quad U_{\text{в}} \Big|_{v=0} = \frac{P_{\text{с}} \Psi_{\text{т}} \mu_{\text{в}}}{R T \Big|_{v=0}} - U_{\text{п}} \Big|_{v=0} \frac{\mu_{\text{в}}}{\mu_{\text{п}}}. \quad (13)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  может быть использована формула для теплоотдачи в кипящем слое  $Nu=0,03Pr^{0,33}Re$  [9].

Решение дифференциальных уравнений (1) – (4) при граничных условиях (10) – (13) может быть проведено численным методом на базе явной трехслойной пересчетной разностной схемы Никитенко Н.И. [10] и процедуре расщепления алгоритма по физическим факторам. Разностная аппроксимация уравнения переноса жидкой фазы в сферических координатах на равномерной разностной сетке  $r_i = ih$ , ( $i = 0, 1, \dots, I$ ,  $h = \text{const}$ ),  $t_n = nl$  ( $n = 0, 1, \dots, l > 0$ ) в соответствии с указанной схемой представляется в виде

$$\begin{aligned} \frac{\bar{U}_{\text{ж}_i}^{n+1} - U_{\text{ж}_i}^n}{l} &= - \left[ \left( (w_{\text{ж}} U_{\text{ж}})_{i+1}^n - (w_{\text{ж}} U_{\text{ж}})_i^n \right) - \left( (w_{\text{ж}} U_{\text{ж}})_i^n - (w_{\text{ж}} U_{\text{ж}})_{i-1}^n \right) \right] / (2h^2) \\ &+ (1 + \Omega_{\text{ж}}) \frac{U_{\text{ж}_i}^{n+1} - \bar{U}_{\text{ж}_i}^{n+1}}{l} - \Omega_{\text{ж}} \frac{U_{\text{ж}_i}^n - U_{\text{ж}_i}^{n-1}}{l} = \\ &= - \left[ \left( (w_{\text{ж}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i+1}^n - (w_{\text{ж}} \bar{U}_{\text{ж}})_i^n \right) - \left( (w_{\text{ж}} \bar{U}_{\text{ж}})_i^n - (w_{\text{ж}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i-1}^n \right) \right] / (2h^2) + \\ &+ \frac{1}{2r_i^2} \left[ (D_{\text{ж}_{i+1}} r_{i+1}^2 + D_{\text{ж}_i} r_i^2) (\bar{U}_{\text{ж}_{i+1}}^n - \bar{U}_{\text{ж}_i}^n) - (D_{\text{ж}_i} r_i^2 + D_{\text{ж}_{i-1}} r_{i-1}^2) (\bar{U}_{\text{ж}_i}^n - \bar{U}_{\text{ж}_{i-1}}^n) \right] / h^2 - I_V \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{U_{\text{ж}_i}^{n+1} - \bar{U}_{\text{ж}_i}^{n+1}}{l} = \frac{\bar{U}_{\text{ж}_i}^{n+1}}{1 + \varepsilon_V} \frac{\varepsilon_V^{n+1} - \varepsilon_V^n}{l} \quad (16)$$

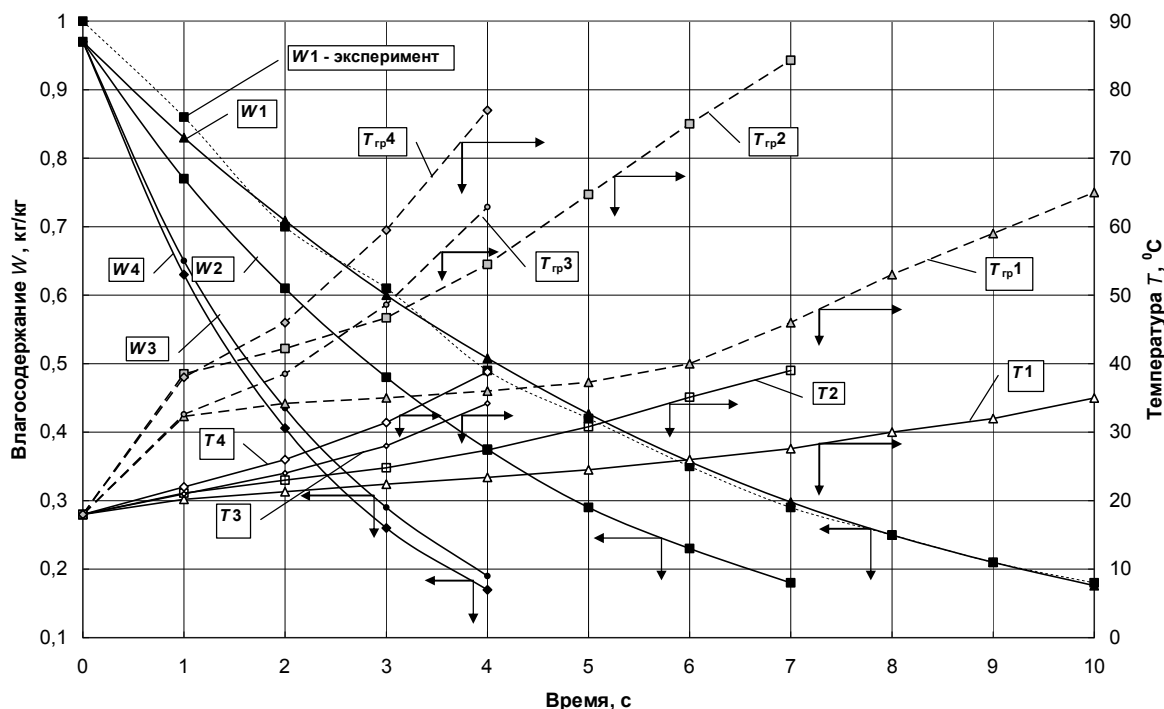
Разностное уравнение, аппроксимирующее граничное условие (12) для поверхности  $r = R$

$$D_{\text{ж}} \frac{\bar{U}_{\text{ж}_I}^{n+1} - \bar{U}_{\text{ж}_{I-1}}^{n+1}}{h} = \gamma_{\text{с}} \left\{ \varphi_{\text{т}} \left[ \exp\left(\frac{A}{R_y \bar{T}_I^n}\right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_{\text{с}} \left[ \exp\left(\frac{A}{R_y T_{\text{с}}}\right) - 1 \right]^{-1} \right\} \quad (17)$$

Аналогичным образом аппроксимируются уравнения (1), (3), (4) и граничные условия (11), (13). Погрешность аппроксимации разностными уравнениями (14) – (16) дифференциального уравнения (2) имеет порядок  $O(l + h^2)$ . Значение параметра  $\Omega_{\text{ж}} \geq 0$ , который устраняет ограничения на шаг по времени, выбираются после построения разностной сетки исходя из условия устойчивости разностных уравнений (14) – (16):  $l_{\text{ж}} \leq \left\{ (w_{\text{ж}_r} / h)^{-1}; (1 + 2\Omega_{\text{ж}}) / (2D_{\text{ж}} h^{-2}) \right\}$ . Расчетный шаг по времени  $l$  выбирается из условия  $l \leq \min(l_T; l_{\text{ж}}; l_{\text{п}}; l_{\text{в}})$ , где  $l_T; l_{\text{ж}}; l_{\text{п}}; l_{\text{в}}$  — допустимые шаги по времени для разностных аппроксимаций дифференциальных уравнений соответственно (1), (2), (3) и (4).

На базе представленной математической модели проводился расчет сушки верхового торфа, которая преимущественно осуществляется дымовыми газами в сушильной установке с кипящим слоем. Частицы торфа имеют форму, наиболее приближенную к сферической. Расчеты проводились при следующих исходных данных:  $T_0 = 293$  К;  $W_0 = 0,97$  кг/кг;  $\lambda_{\text{т}} = 0,1$  Вт/(м·К);  $c_{\text{т}} = 1970$  Дж/(кг·К);  $\rho_{\text{т}} = 600$  кг/м<sup>3</sup>;  $P_{\text{пс}} = 1,4$  кПа;  $A = A_D = 0,4205 \cdot 10^8$  Дж/кмоль;  $\gamma_{D_{\text{ж}}} = 0,9 \cdot 10^{-8}$ ;  $\gamma_{D_{\text{п}}} = 0,134 \cdot 10^{-4}$ ;  $\Pi = 0,6$ . Значения диффузионных коэффициентов  $\gamma_{D_{\text{ж}}}$  и  $\gamma_{D_{\text{п}}}$  определялись в результате сопоставления расчетных и экспериментальных данных по кинетике сушки сферической торфяной частицы диаметром 7 мм, размещенной в потоке набегающего воздуха с температурой 120 °С [2]. На рис.1 представлены результаты численных и физических [2] экспериментов сушки сферической частицы верхового торфа диаметром 7 и 5 мм при равномерном ее обдуве сушильным агентом с температурой 120 °С и 150 °С. Скорость сушильного агента 4 м/с, а влагосодержание 12 г/кг сухих газов.

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ.  
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ**



1 –  $T_c=120^\circ\text{C}$ ,  $d=7\text{ мм}$ ; 2 –  $T_c=150^\circ\text{C}$ ,  $d=7\text{ мм}$ ; 3 –  $T_c=120^\circ\text{C}$ ,  $d=5\text{ мм}$ ; 4 –  $T_c=150^\circ\text{C}$ ,  $d=5\text{ мм}$

**Рис. 1** – Графіки зміни середніх значень вологості  $W$ , температури  $T$ , а також температури на поверхні  $T_{гр}$  сферическої частини торфа діаметром  $d$  при її обезвоживанні во взвешеному шарі з температурою теплоносія  $T_c$

**Висновки.** Результати розрахунку добре збігаються з експериментальними даними, що свідчить про адекватність математичного опису процесу та можливість використання математичної моделі та методу розрахунку для вибору оптимальних режимних параметрів сушки фрезерного торфу та інших дисперсних пористих матеріалів, частинки яких мають близьку до сферическої форми, в апаратах киплячого шару.

#### Література

1. П.В. Акулич Термогидродинамічні процеси в техніці сушки. Минск: НАНБ Інститут тепло- та масообміну ім. А.В. Лыкова, 2002. 268 с.
2. Модель високотемпературної сушки сферических торф'яних частинок та її експериментальне підтвердження / Ю.Ф. Снежкін, Д.Н. Коринчук // Промислова теплотехніка. — 2004. — Т. 26, № 6. — С. 134-137.
3. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсних матеріалів. М.: Хімія, 1988. 352 с.
4. Никитенко Н.И., Снежкін Ю.Ф., Сорокіна Н.Н. Математичне моделювання тепломасопереносу, фазових перетворень та усадки з метою оптимізації процесу сушки термолабільних матеріалів // ИФЖ. 2005. Т. 78, № 1. С. 74.
5. Никитенко Н.И. Проблеми радіаційної теорії тепло- та масопереносу в твердих та рідких середовищах // ИФЖ. 2000. Т. 73. № 4. С. 851.
6. Никитенко Н.И. Дослідження динаміки випаровування конденсованих тіл на основі закону інтенсивності спектрального випромінювання частинок // ИФЖ. 2002. Т. 75. № 3. С. 128.
7. Никитенко Н.И., Снежкін Ю.Ф., Сорокіна Н.Н., Кольчик Ю.Н. Молекулярно-радіаційна теорія та методи розрахунку тепло- та масообміну. Київ: Наукова думка, 2014. 744 с.
8. Дослідження ізотерм сорбції та десорбції // 2015. Режим доступу: [http://mechtrans.ru/info/issledovanie\\_izoterm\\_sorbtsii\\_i\\_desorbtsii](http://mechtrans.ru/info/issledovanie_izoterm_sorbtsii_i_desorbtsii).
9. Кутателадзе С. С. Основи теорії теплообміну. — Вид. 5-е перероб. та доп. — М.: Атомиздат, 1979, 416 с. Режим доступу: [http://info.ternam.ru/book\\_ott.php?id=127](http://info.ternam.ru/book_ott.php?id=127)
10. Никитенко Н.И. Теорія тепломасопереносу. Київ: Наукова думка, 1983. 352 с.