

УУДК 532.516:536.24

КОНВЕКТИВНО-КОНДЕНСАЦИОННЫЙ СПОСОБ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Сороковая Н.Н., канд. техн. наук, Снежкин Ю.Ф., член-корреспондент НАН Украины,

Шапарь Р.А., канд. техн. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

Представлені математична модель і чисельний метод розрахунку динаміки тепломасопереносу, фазових перетворень і усадки при сушінні колоїдних капілярно-пористих тіл в прямоточній стрічковій сушарці. Викладається спосіб зневоднення термолабільних матеріалів, який дозволяє скоротити час сушіння і забезпечити енергоресурсозбереження.

Представляются математическая модель и численный метод расчета динамики тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел в прямоточной ленточной сушилке. Излагается способ сушки термолабильных материалов, который позволяет сократить время процесса и обеспечить энергоресурсосбережение.

A mathematical model and numerical method for calculating the dynamics of heat and mass transfer, phase transitions and shrinkage during drying of colloidal capillary-porous bodies in continuous belt dryer is submitted. The method of dehydration of thermolabile materials, which allows for faster drying times and ensure energy and resource conservation is described.

Библ. 10, рис. 2.

Ключевые слова: конвективно-конденсационный способ сушки, термолабильные материалы, математическое моделирование, непрерывная сушка, ленточная сушилка.

a – коэффициент температуропроводности;

A – энергия активации молекул;

c – удельная изобарная теплоемкость;

d – влагосодержание теплоносителя;

D – коэффициент диффузии;

E – внутренняя энергия;

f_V – дифференциальная функция распределения пор по объему;

G – массовый расход;

h, l – размер шагов разностной сетки по пространственной координате и времени;

H – толщина;

i, m, n – порядковые номера шагов разностной сетки по координатам и времени;

I – интенсивность фазового превращения;

J – плотность потока жидкости, пара или воздуха;

L – удельная теплота фазового перехода;

N – термоконцентрационная функция;

P – давление;

R – универсальная газовая постоянная;

Re – число Рейнольдса;

t – время;

T – температура;

U_ψ – объемная концентрация компонента ;

V – объем;

w – скорость;

W – влагосодержание материала;

α – коэффициент теплоотдачи;

β_T – коэффициент линейного термического расширения;

β_ψ – коэффициент линейной усадки при изменении концентрации компонента ;

γ – коэффициент испарения;

δ_ψ – относительный коэффициент термодиффузии компонента ;

$\bar{\delta}$ – относительная толщина слоя конденсированного тела;

ε_V – относительная объемная деформация;

λ – коэффициент теплопроводности;

μ – молекулярная масса вещества;

ν – нормаль к граничной поверхности;
 ρ – парциальная плотность компонента;
 ϕ – степень насыщения парогазовой смеси;
 Ψ – объемная доля пористой системы, занятая компонентом фазы;
 Ω – весовой параметр разностного уравнения;
 ∇ – оператор Гамильтона.

Индексы:

0 – начальное значение;
 ν – нормаль к внешней границе тела;

v – воздух;
 $г$ – газ;
 $ж$ – жидкость;
 $м$ – мокрый термометр;
 $н$ – насыщенное состояние;
 $п$ – пар;
 $т$ – твердое пористое тело;
 $с$ – сушильный агент;
 $эф$ – эффективное значение;
 L – конвейерная лента;
 V – объем тела.

Современной тенденцией создания эффективных сушильных технологий является снижение энергопотребления при сохранении высокого качества готовой продукции. Распространенным способом достижения энергосбережения остается интенсификация процесса сушки. Большинство влажных пористых тел относятся к термолабильным материалам. Для таких материалов температура в каждый момент времени должна оставаться ниже некоторого предельно допустимого значения T^* . Поэтому интенсификация обезвоживания за счет повышения температуры теплоносителя эффективна в случаях, когда воздействие повышенных температур не приводит к необратимым их качественным изменениям. Прямоточные сушильные установки обеспечивают наиболее благоприятные условия сушки термолабильных материалов [1]. В них сушильный агент при максимальной температуре контактирует с влажным телом, подогревая его до температуры мокрого термометра, которая обычно ниже T^* , а по мере уменьшения влагосодержания материала снижается температура сушильного агента, что как правило исключает перегрев материала выше предельно допустимой для него температуры T^* , но и снижает интенсивность прохождения процесса. При этом влагосодержание сушильного агента может возрастать достаточно существенно, что не только замедляет скорость сушки, но часто не позволяет досушить продукт до низкой конечной влажности. Осушка теплоносителя на заключительном этапе обезвоживания интенсифицирует испарение жидкости из поверхностных слоев материала, но это в свою очередь приводит к резкому снижению его температуры, что делает целесообразным дополнительно повышать температуру сушильного агента. Следовательно, разработка высокоэффективной технологии обезвоживания термолабильных материалов в прямоточной ленточной сушилке связана с необходимостью изменения температуры и влагосодержания теплоносителя в процессе сушки.

Далее излагается новый энергоресурсосберегающий способ непрерывной сушки термолабильных материалов в ленточной прямоточной сушилке. Он включает в себя два этапа. На первом этапе в камеру подается сушильный агент с заданной скоростью w_{c0} , влагосодержанием d_{c0} , давлением P_{c0} и температурой T_{c0} , которая существенно выше предельно допустимой T^* для данного материала. Параметры сушильного агента должны быть выбраны таким образом, чтобы температура мокрого термометра T_m была ниже T^* . Первый этап сушки завершается, когда температура на наружной границе тела приближается к значению T^* , а парциальное давление пара P_{nc} в сушильном агенте и соответственно влагосодержание d_c достигает значения, при котором изменение влагосодержания на поверхности материала практически не наблюдается. На втором этапе подается сушильный агент, предварительно осушенный до низкого влагосодержания и нагретый до достаточно высокой температуры. Эта температура выбирается максимально возможной, но такой, чтобы ее воздействие не

допустило перегрева тела на втором этапе выше значения T^* . С технической точки зрения организовать сушку в соответствии с предложенным способом можно при наличии в сушильной установке двух рабочих зон.

Для реализации предлагаемого конвективно-конденсационного способа сушки необходимо располагать графиками изменения влагосодержания и температуры сушильного агента. Эти графики определяются в зависимости от вида материала, его геометрических и теплофизических характеристик, начальных значений температуры и влагосодержания, от скорости, температуры и влажности сушильного агента, скорости ленты и геометрических параметров сушильной камеры. Экспериментальное нахождение такого рода графиков сопряжено со значительными трудностями. Рациональный путь их получения базируется на применении математического моделирования. В [2] представлена математическая модель динамики теплопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел в прямоточной ленточной сушилке, адекватность которой подтверждается сопоставлением расчетных и экспериментальных данных. Она строилась на базе уравнения переноса субстанции W (массы компонентов, импульса, энергии) полученного в работе [3]

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

Плотность потока \mathbf{j}_W субстанции W представляется суммой: $\mathbf{j}_W = \mathbf{j}_W^d + \mathbf{j}_W^f$. Плотности диффузионных потоков энергии и массы компонентов ψ ($\psi = \text{ж, п, в}$): $\mathbf{j}^d = -\lambda \nabla T + \sum_{\psi} E_{\psi} \mathbf{j}_{\psi}^d$ и $\mathbf{j}_{\psi}^d = -D_{\psi} (\nabla U_{\psi} + \delta_{\psi}^T \nabla T)$.

Плотности фильтрационных потоков находятся по формулам: $\mathbf{j}_{\text{ж}}^f = U_{\text{ж}} \mathbf{w}_{\text{ж}}$, $\mathbf{j}_{\text{п}}^f = U_{\text{п}} \mathbf{w}_{\text{п}}$, $\mathbf{j}_{\text{в}}^f = U_{\text{в}} \mathbf{w}_{\text{в}}$.

Скорости фильтрации фаз определяются по закону Дарси $\mathbf{w}_{\psi} = -K_0 K_{\psi} \nabla P_{\psi} / \eta_{\psi}$, $\psi = \text{ж, г}$, где K_0 – общая проницаемость среды, K_{ψ} – относительная проницаемость, η_{ψ} – динамический коэффициент вязкости. При наличии фильтрации, компоненты ψ связанного вещества перемещаются со скоростью $\mathbf{w} = \mathbf{w}_L + \mathbf{w}_{\psi}$, \mathbf{w}_L – скорость ленты.

При нормальных условиях режим работы ленточной сушилки является установившимся, то есть в каждой точке сушильной камеры температура и объемные концентрации компонентов пористого материала остаются неизменными во времени и процессы теплообмена и усадки являются стационарными ($\partial W / \partial t = 0$, $\partial \varepsilon_V / \partial t = 0$). Скорость перемещения материала w_L в аппарате постоянна. Обычно толщина высушиваемого слоя X_m существенно меньше длины Z и ширины Y ленты. С учетом принятых допущений система, описывающая теплоперенос при непрерывной диффузионной сушке коллоидного капиллярно-пористого материала, имеет следующий вид:

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

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

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

$\psi = \text{ж, п, в}$,

$$c_{\text{эф}} = c_{\text{т}} U_{\text{т}} + c_{\text{ж}} U_{\text{ж}} + c_{\text{п}} U_{\text{п}} + c_{\text{в}} U_{\text{в}},$$

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{т}} U_{\text{т}} / \rho_{\text{т}} + \lambda_{\text{ж}} U_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}} + \lambda_{\text{п}} U_{\text{п}} / \rho_{\text{п}} + \lambda_{\text{в}} U_{\text{в}} / \rho_{\text{в}}. \quad (4)$$

Удельная теплота испарения L учитывает удельную теплоту испарения свободной жидкости и удельную энергию десорбции связанной влаги. Вторым членом правой части (4), который учитывает перенос энергии за счет диффузии, можно пренебречь [3].

Коэффициенты диффузии для жидкой и газовой фаз находятся по формулам: $D_{\text{ж}} = \gamma_{D_{\text{ж}}} [\exp(A_D / RT) - 1]^{-1}$, $D_{\text{п}} = D_{\text{в}} = \lambda_{D_{\text{п}}} T^{3/2} / P_{\text{г}}$, где A_D – энергия активации для процесса диффузии; $\gamma_{D_{\text{ж}}}$, $\gamma_{D_{\text{п}}}$ – диффузионные коэффициенты. Формула Н.И. Никитенко для $D_{\text{ж}}$ [4] в предельных случаях переходит в формулу Аррениуса для твердых тел и в формулу Эйнштейна для жидких сред.

Относительная объемная деформация ε_V связана с нормальными компонентами ε_{11} , ε_{22} , ε_{33} тензора деформации ε_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) соотношением $\varepsilon_V(t) = [1 + \varepsilon_{11}(t)][1 + \varepsilon_{22}(t)][1 + \varepsilon_{33}(t)] - 1$. При известных значениях функций T и U_{ψ} ($\psi = \text{ж, п, в}$), функция ε_V находится на основе уравнения термokonцентрационного деформирования [5], решения которого для тел простейшей геометрической формы получены аналитически. Для пластины $0 < x_1 < H$, деформирование которой

связано с симметричным относительно ее средней плоскости $x_1 = H/2$ распределением концентрации компонентов и температуры вдоль оси x_1 , аналитическое решение имеет вид

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \frac{1}{H} \int_0^H N dx_1, \quad \varepsilon_{11} = \frac{1+\nu}{1-\nu} N - \frac{2\nu}{1-\nu} \varepsilon_{22}. \quad (5)$$

Термоконцентрационная функция N определяет изменение удельного объема тела при его свободном расширении вследствие теплопроводности, диффузии, фильтрации, фазовых превращений [5]:

$$N = \beta_T (T - T_0) + \sum_{\Psi} \beta_{x\Psi} (U_{\Psi} - U_{\Psi 0}), \quad \beta_T = (\partial x / \partial T) / x;$$

$$\beta_{x\Psi} = (\partial x / \partial U_{\Psi}) / x.$$

Интенсивность фазовых превращений на внешней границе тела [4] пропорциональна разности потоков испаряющейся и конденсирующейся жидкости

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

$\gamma_c = \varepsilon \rho_{ж} \delta^* / 4$.
Здесь ε – коэффициент излучения; δ^* – средняя длина диффузионного перескока активизированной частицы в конденсированном слое; φ_{τ} – влажность парогазовой смеси, которой согласно изотерме сорбции отвечает объемная концентрация жидкости $U_{ж}$ в данной точке тела. Значение φ_{τ} может быть определено из формулы, полученной в [6] для равновесной толщины слоя конденсата δ на поверхности твердого тела, находящегося в среде с параметрами φ и P_{π} : $\delta = \delta^* \bar{\delta} = \delta^* (1 - \sqrt{1 - P_{\pi} / P_{\pi}^*}) = \delta^* (1 - \sqrt{1 - \varphi})$, где $\bar{\delta} = \delta / \delta^*$ при $0 < \delta < \delta^*$ и $\bar{\delta} = 1$ при $\delta < \delta^*$, откуда

$$\varphi_{\tau} = \bar{\delta} (2 - \bar{\delta}). \quad (7)$$

Парциальное давление пара находится из уравнения состояния $P_{\pi} = \rho_{\pi} RT / \mu_{\pi}$, а парциальная плотность пара $\rho_{\pi} = U_{\pi} / \Psi_{\pi}$. Объемные доли газовой, жидкой и твердой фаз соответственно равны $\Psi_{\pi} = 1 - \Psi_{\tau} - \Psi_{ж}$, $\Psi_{ж} = U_{ж} / \rho_{ж}$ и $\Psi_{\tau} = 1 - \Pi$. Давление насыщения P_{π}^* определялся по формуле Никитенко Н.И. [6]: $P_{\pi}^* = N_p \sqrt{T} [\exp(A / RT) - 1]^{-1}$, $N_p = \text{const}$, которая хорошо согласуется с табличными данными.

Удельная интенсивность испарения в капиллярах тела находится по формуле, вытекающей из (6) при условии, что температуры фаз в каждой точке тела совпадают

$$I_V = \gamma_c [\exp(A / RT) - 1]^{-1} (\varphi_{\tau} - \varphi) S. \quad (8)$$

Здесь S – удельная площадь контакта жидкости и газа в частично заполненных жидкостью порах. Для нахождения функции S получена формула [7]:

$$S = \frac{2\sqrt{1 - \varphi_{\tau}}}{\rho_{ж} \delta^*} \frac{\partial U_{ж}}{\partial \varphi_{\tau}}. \quad (9)$$

Производная $\partial U_{ж} / \partial \varphi_{\tau}$ определяется путем дифференцирования уравнения изотермы десорбции. Если изотерма задана в виде $U_{ж} = U_{\max} \varphi_{\tau}^g$, $g = \text{const}$, то $\partial U_{ж} / \partial \varphi_{\tau} = U_{\max} g \varphi_{\tau}^{g-1}$.

На входе в сушильную камеру все физические параметры сушильного агента считаются известными. Определение средних значений температуры T_c , давления P_c , объемных концентраций пара $U_{\text{сп}}$ и воздуха $U_{\text{св}}$ в теплоносителе в сечении z по длине канала проводилось по балансным уравнениям для элементарного объема $\Delta V = S_c \Delta z$ [2], где S_c – площадь сечения канала, $S_c = XY$, X – высота канала.

Изменение давления ΔP_c в сечении z определяется из уравнения Бернулли для течения газа в канале $\Delta P_c = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} + \Delta P_{c3}$, где $\Delta P_{c1} = \lambda_{\text{тр}} U_c w_c^2 \Delta z / 2d_{\text{экр}}$ – потери напора на трение потока на стенках канала; $\Delta P_{c2} = \zeta U_c w_c^2 / 2$ – потери, вызванные местными сопротивлениями; $\Delta P_{c3} = \rho g \Delta z$ – статический напор потока. Коэффициент трения $\lambda_{\text{тр}}$ зависит от режима течения газа [8]: $\lambda_{\text{тр}} = 64 / \text{Re}$ при $\text{Re} < 2320$, $\lambda_{\text{тр}} = 64 / \text{Re} + 0,136 / \text{Re}^{0,18}$ при $\text{Re} = 2320 - 10^6$. Эквивалентный диаметр $d_{\text{экр}} = 2S_c / P_c = XY / (X+Y)$, где $P_c = 2(X+Y)$ – периметр сечения канала. Если местными сопротивлениями можно пренебречь, дифференциальное уравнение потери напора в канале имеет вид

$$\frac{dP_c}{dz} = -\lambda_{\text{тр}} \rho_c \frac{w_c^2}{2d_{\text{экр}}} + \rho_c \cos(g, z). \quad (10)$$

Средняя температура теплоносителя T_c по сечению z находится из уравнения баланса энергии, записанного для элементарного объема $dV = S_c dz$ канала

$$dq_c / dz = [\alpha - \gamma_{\text{пс}} (U_{\pi} |_{v=0} - \rho_{\text{пс}} \Psi_{\pi}) c_{\pi} - \gamma_{\text{вс}} (U_{\text{в}} |_{v=0} - \rho_{\text{вс}} \Psi_{\pi}) c_{\text{в}}] (T_c - T |_{v=0}) - LI_c] Y, \quad (11)$$

где q_c – поток энергии через сечение z канала, $q_c(z) = [G_{\text{пс}}(z) c_{\pi} + G_{\text{вс}}(z) c_{\text{в}}] T_c(z)$.

Средняя скорость w_c сушильного агента в

сечении z канала, в соответствии с уравнениями состояния и неразрывности для пара и воздуха, находится по формуле

$$w_c(z) = \left[\frac{G_{пс}(z)}{\mu_{п}} + \frac{G_{вс}(z)}{\mu_{в}} \right] \frac{RT_c(z)}{P_c(z)S_c}. \quad (12)$$

Изменения расхода воздушной и паровой составляющих сушильного агента через сечение канала z рассчитываются из уравнения баланса массы для каждого компонента

$$dG_{вс}(z)/dz = \gamma_{вс} [\rho_{в}(z, X) - \rho_{вс}(z) \Psi_{г}] Y; \quad (13)$$

$$dG_{пс}(z)/dz = \gamma_{пс} [\rho_{п}(z, X) - \rho_{пс}(z) \Psi_{г}] Y,$$

где $\rho_{пс}$, $\rho_{вс}$ – парциальные плотности пара и воздуха в сушильном агенте, $\rho_{пс} = U_{пс}$, $\rho_{вс} = U_{вс}$.

Расходы воздушной $G_{вс}(z)$ и паровой $G_{пс}(z)$ фаз сушильного агента через сечение z канала

$$G_{пс}(z) = w_c S_c \rho_{пс}(z); \quad G_{вс}(z) = w_c S_c \rho_{вс}(z). \quad (14)$$

Общий расход сушильного агента $G_{с0}$ через сечение $z = 0$ канала считается заданным

$$G_{с0} = G_{пс0} + G_{вс0} = w_{с0} S_{с0} (U_{пс0} + U_{вс0}), \quad (15)$$

а расход G_c через произвольное сечение z равен сумме расходов паровой и воздушной фаз

$$G_c(z) = G_{пс}(z) + G_{вс}(z) = w_c S_c [\rho_{пс}(z) + \rho_{вс}(z)]. \quad (16)$$

Общий расход материала $G_{м0}$ на входе в канал в сечении $z = 0$ равен

$$G_{м0} = G_{т0} + G_{ж0} + G_{п0} + G_{в0} = w_L S_M (U_{т0} + U_{ж0} + U_{п0} + U_{в0}), \quad (17)$$

где $S_M = X_M Y$ – площадь сечения слоя материала, а через сечение z общий расход $G_M(z)$ равен

$$G_M(z) = w_L S_M [\bar{U}_т(z) + \bar{U}_ж(z) + \bar{U}_п(z) + \bar{U}_в(z)], \quad (18)$$

где $\bar{U}_\psi(z)$ – средняя объемная концентрация компонента ψ ($\psi = т, ж, п, в$) тела по сечению S_M .

Если поверхности $x=0, y=0, y=Y_M$ материала и поверхности $x=X_M+X, y=0, y=Y$ канала непроницаемы, то суммарный расход материала и сушильного агента в произвольном сечении системы материал – сушильный агент остается неизменным, т.е. $G_M(z) + G_c(z) = G_{м0} + G_{с0} = const$, а расход пара теплоносителя через сечение z канала согласно уравнению баланса массы

$$G_{пс}(z) = w_c S_c \rho_{пс}(z) = G_{м0} + G_{с0} - G_M(z) - G_{вс}(z). \quad (19)$$

Парциальные плотности пара $\rho_{пс}$ и воздуха $\rho_{вс}$ в сечении z находятся по уравнениям неразрывности для каждого компонента:

$$\rho_{пс}(z) = G_{пс}(z) / [w_c(z) S_c], \quad \rho_{вс}(z) = G_{вс}(z) / [w_c(z) S_c]. \quad (20)$$

Парциальные давления пара $P_{пс}$ и воздуха $P_{вс}$ находятся по уравнениям состояния

$$P_{пс}(z) = R \rho_{пс}(z) T_c(z) / \mu_{п}, \quad (21)$$

$$P_{вс}(z) = R \rho_{вс}(z) T_c(z) / \mu,$$

Условия тепломассообмена на границе $x = X_M$ контакта высушиваемого материала и сушильного агента представляются в виде

$$D_{ж} \frac{\partial U_{ж}}{\partial v} \Big|_{v=0} = -I. \quad (22)$$

$$D_{п} \frac{\partial U_{п}}{\partial v} \Big|_{v=0} = I - \gamma_{пс} (U_{п}|_{v=0} - \rho_{пс} \Psi_{г}), \quad (23)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial v} \Big|_{v=0} = \alpha (T_c - T|_{v=0}) - LI - [\gamma_{пс} (U_{п}|_{v=0} - \rho_{пс} \Psi_{г}) c_{п} + \gamma_{вс} (U_{в}|_{v=0} - \rho_{вс} \Psi_{г})] (T_c - T|_{v=0}). \quad (24)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (2) – (4), замыкаемой уравнениями (5) – (24) может быть проведено численным методом на базе трехслойной явной разностной схемы Никитенко Н.И. [5] и процедуры расщепления алгоритма по физическим факторам [3]. Разностные аппроксимации уравнений (2) – (4) в декартовых координатах $x = x_1, y = x_2, z = x_3$ на неравномерной разностной сетке $x_{i+1}^n = x_i^n + h_{x,i+1}^n$ ($i = 0, 1, \dots, I$), $y_{m+1}^n = y_m^n + h_{y,m+1}^n$ ($m = 0, 1, \dots, M$), $z = nl$ ($n = 0, 1, \dots; l > 0$) в соответствии с указанной схемой имеют вид

$$(1 + \Omega_T) \delta_z T^n - \Omega_T \delta_z T^{n-1} = \frac{1}{w_L c_{\text{эф}}} \left\{ \sum_{k=1}^3 [\delta_{x_k} (\lambda_{\text{эф}} \delta_{x_k} T)] - LI_V \right\}, \quad (25)$$

$$c_{\text{эф}} = c_{т} \bar{U}_{т} + c_{ж} \bar{U}_{ж} + c_{п} \bar{U}_{п} + c_{в} \bar{U}_{в},$$

$$(1 + \Omega_{ж}) \delta_z \bar{U}_{ж} - \Omega_{ж} \delta_z U_{ж}^{n-1} = \frac{1}{w_L} \sum_{k=1}^3 [\delta_{x_k} (D_{ж} \delta_{x_k} U_{ж}) + \delta_{x_k} (D_{ж} \delta_{x_k}^T \delta_{x_k} T)] - I_V, \quad (26)$$

$$\delta_z \bar{U}_{ж} = \frac{\bar{U}_{ж}}{1 + \varepsilon_V} \delta_z \varepsilon_V, \quad (27)$$

$$(1 + \Omega_{п}) \delta_z U_{п}^n - \Omega_{п} \delta_z U_{п}^{n-1} = \frac{1}{w_L} \sum_{k=1}^3 [\delta_{x_k} (D_{п} \delta_{x_k} U_{п}) + \delta_{x_k} (D_{п} \delta_{x_k}^T \delta_{x_k} T)] + I_V, \quad (28)$$

$$\delta_z \bar{U}_{п} = \frac{\bar{U}_{п}}{1 + \varepsilon_V} \delta_z \varepsilon_V. \quad (29)$$

Весовой параметр Ω устраняет ограничения на шаг по времени, $\Omega \geq 0$.

В разностных уравнениях (25) – (29) сеточные функции $W_{im}^n, W_{im}^{n-1}, \bar{W}_{im}^{n+1}$ ($W = T, U_{ж}, U_{п}, \epsilon_p$) для узловой точки (x_i, y_m, z) записаны для простоты без нижних индексов: $W = W_{im}^n, W^{n-1} = W_{im}^{n-1}$ и $\bar{W} = \bar{W}_{im}^{n+1}$. Производные для случая двумерной задачи $W = W(x, y)$ определяются разностными соотношениями:

$$\delta_z W = (W_{im}^{n+1} - W_{im}^n) / l; \quad \delta_{x_i} W = (W_{i+1}^n - W_{i-1}^n) / 2h_x;$$

$$\delta_z \bar{W} = (\bar{W}_{im}^{n+1} - W_{im}^n) / l; \quad \delta_{x_i} (D \delta_{x_i} W^n) = \left[(D_{i+1}^n + D_i^n) \cdot (W_{i+1}^n - W_i^n) - (D_i^n - D_{i-1}^n) (W_i^n - W_{i-1}^n) \right] / 2h_x^2; \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

Погрешность аппроксимации уравнений (2) – (4) разностными уравнениями (25) – (29) имеет порядок $l + h_x^2 + h_y^2$. Необходимые условия устойчивости уравнений вида (25), (26), (28) находятся методом условного задания некоторых искомым функций системы, предложенный в [5]. Условие устойчивости для уравнения (26) представляется следующим образом: $l \leq (1 + 2\Omega_W) \left[2D_{ж} \sum_{k=1}^3 h_k^{-2} \right]^{-1}$.

Разностные аппроксимации обыкновенных дифференциальных уравнений (10), (11), (13) имеют вид:

$$P_c^{n+1} = P_c^n - \lambda_{тр} \rho_c^n (w^n)^2 / (2d_{эжв}) + \rho_c^n \cos(\mathbf{g}, z), \quad (30)$$

$$T_c^{n+1} = (T_c^n (G_{пс}^n c_{п} + G_{вс}^n c_{в}) + h_x Y \{ \alpha - \gamma_{пс} (U_{пл}^n - \rho_{пс}^n \Psi_{гI}^n) c_{п} - \gamma_{вс} (U_{вл}^n - \rho_{вс}^n \Psi_{гI}^n) c_{в} \} / (T_c^n - T_{гI}^n) - LI_c) / (G_{пс}^n c_{п} + G_{вс}^n c_{в}), \quad (31)$$

$$G_{вс}^{n+1} = G_{вс}^n + \gamma_{вс} (\rho_{вл}^n - \rho_{вс}^n \Psi_{гI}^n) Y;$$

$$G_{пс}^{n+1} = G_{пс}^n + \gamma_{пс} (\rho_{пл}^n - \rho_{пс}^n \Psi_{гI}^n) Y. \quad (32)$$

Конвективно-конденсационный способ сушки реализуется следующим образом. Определяется толщина слоя материала, подлежащего сушке. По справочным данным и путем измерения находят его физические характеристики, предельно допустимая температура, исходные температура и влажность. Задается расход, давление, влагосодержание и температура сушильного агента на входе в сушильную камеру. На базе представленной математической модели путем численного моделирования находятся графики изменения температуры и влагосодержания сушильного агента исходя из того, чтобы продолжительность процесса была минимальной и температура на поверхности высушиваемого слоя не превышала предельно допустимого значения T^* . Эти графики вместе с указанными исходными параметрами

определяют режим сушки термолабильного материала в ленточной сушилке.

В качестве примера был проведен расчет динамики и кинетики сушки слоя столовой свеклы, симметрично обдуваемый сушильным агентом в прямооточной ленточной сушилке при следующих исходных параметрах [3]: $U_{ж0} = 886,5 \text{ кг/м}^3$; $T^* = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{c0} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$; $w_{ж0} = 5,5 \text{ м/с}$; $P_{пс0} = 103 \text{ кПа}$; $P_{пс0} = 1,5 \text{ кПа}$; $w_L = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; $\Pi = 0,924$; $\lambda_{т} = 0,13 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $c_{т} = 1465 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\rho_{т} = 1050 \text{ кг/м}^3$; $\beta_x = 0,037$; $\gamma_{Дж} = 0,75 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; $\gamma_{Дж} = 0,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $A = A_D = 0,4206 \cdot 10^8 \text{ Дж/кмоль}$. Данные по равновесному влагосодержанию свеклы [9] достаточно хорошо описываются уравнением $W_p = 0,5 W_{\text{max}} [\varphi / (1 - \varphi)]^{2/3}$. Для расчета коэффициента теплоотдачи использовалось уравнение [10]: $Nu = 0,0296 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}$.

На рис.1 приведены графики изменения среднего влагосодержания теплоносителя d_c и столовой свеклы W (а), температуры теплоносителя T_c и поверхности слоя $T_{|_{v=0}}$ (б), высушиваемого конвективно-конденсационным способом для случаев окончания первого этапа сушки, когда давления пара $P_{пс}$ в сушильном агенте достигает значений 15 кПа (кривые 1), 16 кПа (кривые 2), 17 кПа (кривые 3), его осушки до $P_{пс} = 1 \text{ кПа}$ и дополнительного подогрева до $T_c = 105 \text{ }^\circ\text{C}$ на втором этапе. Уменьшение влагосодержания теплоносителя на втором этапе приводит к интенсивному испарению влаги с поверхностных слоев материала и как следствие – к достаточно резкому снижению их температуры.

Основным параметром, интенсифицирующим обезвоживание, является температура материала, поэтому целесообразно дополнительно нагревать осушенный теплоноситель в начале второго этапа сушки. Увеличение продолжительности первого этапа сушки (кривые 2, 3) позволяет досушить материал до более низкого равновесного влагосодержания W_p на втором этапе, однако в случае 3 имеет место повышение температуры поверхности слоя выше T^* , что ухудшает качество готового продукта. Следовательно, наиболее рациональным является режим сушки, определяемый условиями 2.

Необходимо отметить, что высушить высоковлажный термолабильный материал в прямооточ-

ной ленточной сушилке до низкого равновесного влагосодержания без дополнительной осушки и подогрева сушильного агента не представляется возможным. На рис. 2 показаны графики изменения средних влагосодержания теплоносителя и слоя столовой свеклы толщиной $H = 12,5$ мм при его обезвоживании в прямоточной лен-

точной сушилке конвективным и конвективно-конденсационным способом по режиму 2, при котором давление пара $P_{пс}$ в сушильном агенте достигает значения 16 кПа на первом этапе, а затем осушивается до $P_{пс} = 1$ кПа и нагревается до $T_c = 105$ °С на втором этапе.

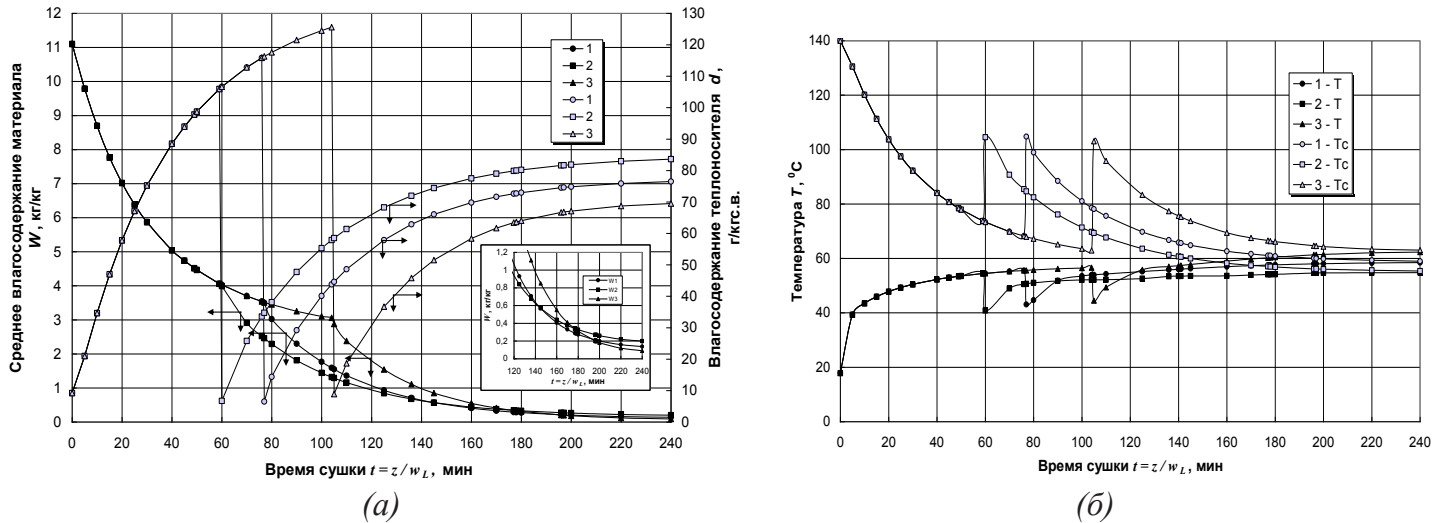


Рис. 1. Графики изменения влагосодержания (а) и температуры (б) теплоносителя и на поверхности слоя столовой свеклы толщиной $H = 12,5$ мм при конвективно-конденсационной сушке в прямоточной ленточной сушилке.

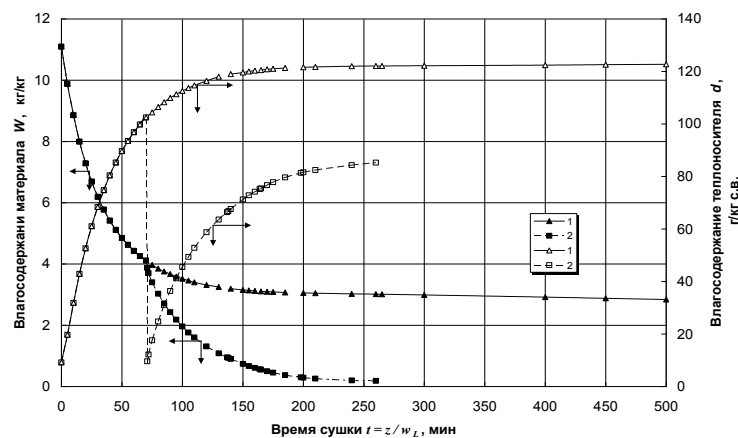


Рис. 2. Графики изменения влагосодержания теплоносителя и слоя столовой свеклы толщиной $H = 12,5$ мм при обезвоживании в прямоточной ленточной сушилке конвективным (1) и конвективно-конденсационным (2) способом.

Выводы

Сформулирована математическая модель и разработан численный метод расчета динамики тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки при непрерывной сушке термолабильных коллоидных капиллярно-пористых тел. В каждый

момент времени параметры T_c , d_c , $P_{пс}$ и ϕ_c соотносятся на $I-d$ диаграмме влажного воздуха, что свидетельствует об адекватности математической модели и эффективности численного метода. Разработан новый конвективно-конденсационный способ сушки термолабильных материа-

лов, который проводится в два этапа. На первом этапе осуществляется постепенное повышение температуры тела до предельно допустимого значения T^* при обдуве его воздухом с начальными температурой, которая существенно выше T^* для данного материала, и влагосодержанием, равным влагосодержанию окружающей среды. На втором этапе материал обдувают сушильным агентом с начальными парциальным давлением не выше 1 кПа и температурой такой, что на поверхности тела температура не превышает T^* , что способствует эффективному удалению связанной влаги из внутренних слоев материала. Этот способ обеспечивает получение качественного высушенного продукта при уменьшении времени и энергозатрат на проведение процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудобаишта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. – Москва: Химия. –1980. –248 с.
2. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. Математическое моделирование динамики обезвоживания в конвективных сушильных установках непрерывного действия // Наукові праці ОНАХТ (Одеської національної академії харчових технологій). – 2013. – Вип. 43. – Т.1. – С. 26 –32.
3. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. Математическое моделирование тепло-массопереноса, фазовых превращений и усадки с целью оптимизации процесса сушки термоблажных материалов // Инженерно-физический журнал. 2005. – Т. 78, – № 1. – С. 74 – 87.
4. Никитенко Н.И. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидких средах // Инженерно-физический журнал. 2000, – Т. 73, – № 4. – С. 851 – 860.
5. Никитенко Н.И. Теория тепло-массопереноса. – Киев: Наукова думка. –1983. –352 с.
6. Никитенко Н.И. Исследование динамики испарения конденсированных тел на основе закона интенсивности спектрального излучения частиц // Инженерно-физический журнал. 2002. – Т.75, – № 3, – С. 128 – 134.
7. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. Развитие теории и методов расчета динамики сорбции и десорбции. // Инженерно-физический журнал. 2010. – Т. 83, – № 3, – С. 779 – 789.
8. Шлипенко З. С. Насосы, компрессоры и вентиляторы. – Киев: Техника. –1976. –368 с.
9. Гинзбург А.С., Громов М.А. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов. – Москва: Агропромиздат. –1987. –273 с.
10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – Москва: Энергоиздат. –1981. – 416 с.

**CONVECTIVE-CONDENSATION
METHOD OF DRYING HEAT-SENSITIVE
MATERIALS IN THE DRYER CONTINUOUS**

Sorokovaya N.N., Snezhkin Yu.F., Shapar R.F.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

Adequate mathematical model is formulated and developed an effective numerical method for the calculation of heat and mass transfer, phase transformations and shrinkage continuous drying heat-sensitive colloidal capillary-porous bodies. Based on simulation results, a new convectively-condensation method of drying heat-sensitive materials, which provides a change in time of the temperature and moisture of the drying agent and is conducted in two stages. In the first stage with the help of a drying agent carried a gradual increase in body temperature to the maximum permissible values for air flow around it with the initial values of the temperature, which is significantly higher than the maximum allowable for a given material, and moisture content, moisture content equal to the environment. In the second step the body is blown onto the drying agent with the initial partial pressure of not higher than 1 kPa and a temperature such that the surface temperature of the material does not exceed the maximum allowable. This method produces a high quality dried product with a decrease in the time and energy to carry out the process.

References 10, fig. 2.

Key words: convection-condensation method of drying, heat-labile materials, mathematical modeling, continuous drying, belt driers.

1. *Rudobashta S.P.* Mass transfer systems in the solid phase. – Moscow: Chemistry. –1980.–248 p. (Rus)

2. *Nikitenko N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya N.N.* Mathematical modeling of dynamics of dehydration in convective dryers continuous // *Naukovi pratsi ONAHT (Odessa National Academy of Food Technologies)* . – 2013. –Vyp. 43. – V.1. – P. 26 – 32. (Rus)

3. *Nikitenko N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya N.N.* Mathematical modeling of heat and mass transfer, phase transformations and shrinkage in order to optimize the drying process, heat-sensitive materials // *Journal of Engineering Physics*. – 2005. – V. 78, – № 1.– P. 74 – 87. (Rus)

4. *Nikitenko N.I.* Radiation theory of heat and mass transfer in solid and liquid media // *Journal of Engineering Physics*. 2000, – V. 73, – № 4. – P. 851 – 860. (Rus)

5. *Nikitenko N.I.* The theory of heat and mass transfer. – Kiev: Naukova Dumka. –1983. – 352 p. (Rus)

6. *Nikitenko N.I.* Study of the dynamics of evaporation of condensed bodies on the basis of the law of the spectral intensity of radiation particles // *Journal of Engineering Physics*. – 2002. – V.75, – № 3, – P. 128 – 134. (Rus)

7. *Nikitenko N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya N.N.* Development of the theory and methods of calculating the dynamics of sorption and desorption. // *Journal of Engineering Physics*. 2010. – V. 83 , – № 3, – P. 779 – 789. (Rus)

8. *Shlipchenko Z.S.* Pumps, compressors and ventilators. – Kiev: Technik. –1976. –368 p. (Rus)

9. *Ginzburg A.S., Gromov M.A.* Thermal characteristics of potatoes, vegetables and fruits. – Moscow: Agropromizdat.–1987. –273 p. (Rus)

10. *Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.* Heat transfer. – Moscow: Energoizdat. – 1981. – 416 p. (Rus)

Получено 24.04.2015

Received 24.04.2015