

Рациональные технологические режимы работы промывного оборудования.

Методы определения рационального состава промывных линий.

Новые устройства для промывки текстильных материалов.

Вопросы экономии вторичных энергоресурсов – ВЭР, в том числе использования теплоты паровоздушных смесей – ПВС являются актуальными практически на каждой стадии отделочного производства текстильных предприятий, а не только в процессах сушки, промывки и пропитки.

Анализ тепловых балансов текстильных предприятий показывает, что использование тепловых ВЭР на них может достигать 50 % и более от всей потребляемой технологической теплоты. При этом технологическая теплота, подводимая к сушильным, красильным и промывным установкам, практически вся переходит в теплоту сбросных растворов и теплоту паровоздушной смеси [1].

Проведённый анализ результатов обследования текстильных предприятий показывает, что теплота сбросных растворов и паровоздушной смеси может быть использована как для нагрева производственной воды, так и для нагрева воздуха в процессах сушки и приточной вентиляции, в различного рода теплообменных аппаратах [1].

Дальнейшие научные исследования и практическая реализация их результатов позволят повысить эффективность технологических процессов химической технологии отделочных производств текстильных предприятий, снизить их энергоёмкость и материалоемкость, улучшить производственную и экологическую безопасность, повысить качество и конкурентоспособность товаров текстильной промышленности.

Литература

1. Сажин Б.С., Кошелева М.К. Процессы сушки и промывки текстильных материалов. - М: ФГБОУ ВПО "МГУДТ" – 2013. - 301с.
2. Кошелева М.К. Повышение производственной и экологической безопасности отделочного производства тонкосуконных фабрик за счёт совершенствования технологии. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2005. № 2. С.100 – 104.
3. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твёрдой фазой. – М.: Химия - 1980. – 248 с.
4. Кошелева М.К., Рудобашта С.П. и др. Устройство промывки текстильных материалов в жгуте. Патент 118639 РФ, заявители и патентообладатели МГТУ им. А.Н. Косыгина и МГАУ им. В.П. Горячкина, опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.
5. Рудобашта С.П., Кошелева М.К. и др. Устройство для обработки промывных вод отделочного производства. Патент РФ, заявители и патентообладатели МГТУ им. А.Н. Косыгина и МГАУ им. В.П. Горячкина, опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.

УДК 532.516:536.24

СПОСОБ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

¹Сорокова Н.Н., канд. техн. наук, с.н.с., ¹Снежкин Ю.Ф., член-корр., проф.,

¹Шапарь Р.А., канд. техн. наук, с.н.с., ²Сороковой Р.Я., магистрант²

¹Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

²Национальный университет пищевых технологий, г. Киев

Излагается способ непрерывной сушки термолабильных материалов, который позволяет сократить время сушки, обеспечить энергосбережение при сохранении высокого качества продукции. Приводится схема ленточной сушильной установки для реализации данного способа.

The method of continuously dehydration of thermolabile materials, which allows for faster drying times and ensure energy and resource conservation is described. The scheme belt drier for accomplishing the method is resulted.

Ключевые слова: непрерывная ленточная сушилка, коллоидные капиллярно-пористые тела, термолабильные материалы, интенсивность испарения, тепловой насос

Развитие сушильной техники и технологий предполагает поиск путей снижения энергопотребления, интенсификации процесса обезвоживания и получение готовой продукции высокого качества. Интен-

фикация сушки термолабильных материалов за счет повышения температуры теплоносителя ограничена, поскольку превышение температуры тела в процессе обезвоживания выше некоторого предельно допустимого значения T^* , приводит к потере биологической и питательной ценности продукта. Наиболее благоприятные условия сушки таких материалов достигаются в прямоточных сушильных установках [1]. В [2] предложен способ сушки термолабильных материалов в ленточной прямоточной сушилке, который проводится в два этапа. На первом этапе 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 не выше T^* . Первый этап сушки завершается, когда температура на наружной границе тела приближается к значению T^* , а парциальное давление пара P_{pc} в сушильном агенте или влагосодержание d_c достигает значения, при котором изменение влагосодержания на поверхности материала не наблюдается. На втором этапе сушки подается сушильный агент, осушенный до низкого влагосодержания и нагретый до температуры, которая выбирается максимально возможной, но чтобы ее воздействие не допустило перегрева тела на втором этапе выше значения T^* .

Для управления процессом сушки необходимо располагать графиками изменения влагосодержания и температуры сушильного агента, которые должны определяться в зависимости от вида материала, его геометрических и теплофизических характеристик, начальных значений температуры и влагосодержания, от скорости, температуры и влажности сушильного агента, а также скорости ленты и геометрических параметров сушильной камеры. Экспериментальное получение такого рода графиков сопряжено со значительными трудностями. Рациональный путь их построения базируется на применении методом математического моделирования динамики тепломассопереноса в пористых системах.

Большинство термолабильных материалов представляют собой коллоидные капиллярно-пористые тела, объем которых в процессе сушки может уменьшаться в несколько раз. В [3] получено дифференциальное уравнение переноса субстанции W (массы компонентов, энергии) для деформируемого тела $\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(W\mathbf{w}) = -\text{div}\mathbf{j}_W + I_W - \frac{W}{1+\varepsilon_V} \left[\frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon_V \mathbf{w}) \right]$. Относительная объемная деформация ε_V связана с нормальными компонентами $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$ 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 температуры T и концентрации U_ψ ($\psi=\text{ж, п, в}$), ε_V находится на основе уравнения термоконцентрационного деформирования [4]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_1} \left(G \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(G \frac{\partial u_i}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(G \frac{\partial u_i}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[G_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(G \frac{\partial u_1}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(G \frac{\partial u_2}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(G \frac{\partial u_3}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} [N(2G + 3G_1)] = 0, \quad i = 1, 2, 3, \end{aligned} \quad (1)$$

где u_i — компоненты вектора смещения, связанные с компонентами тензора деформации ε_{ij} соотношением $\varepsilon_{ij} = \partial u_i / \partial x_j$; G, G_1 — коэффициенты Ляме, $G = E_y / [2(1 + \nu_{II})]$, $G_1 = E_y \nu_{II} / [(1 - 2\nu_{II})(1 + \nu_{II})]$; ν_{II} — коэффициент Пуассона; E_y — модуль упругости; N — термоконцентрационная функция [4], определяющая изменение удельного объема тела при его свободном расширении, обусловленном процессами теплопроводности, диффузии, фильтрации, фазового превращения, $N = \beta_T (T - T_0) + \sum_{\psi} \beta_{x\psi} (\omega_{\psi} - \omega_{\psi 0})$, где $\beta_T = (\partial x / \partial T) / x$; $\beta_{x\psi} = (\partial x / \partial \omega_{\psi}) / x$, ω_{ψ} — массосодержание компонента ψ . Для тел простейшей геометрии решение (1) получено аналитически [5]. 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:

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

Если тело является капиллярно-пористым, его усадкой в процессе сушки можно пренебречь и $\varepsilon_V = 0$.

Плотность потока $\mathbf{j}_W$ субстанции W учитывает диффузионный и фильтрационный перенос: $\mathbf{j}_W = \mathbf{j}_W^D + \mathbf{j}_W^F$. Плотности диффузионных потоков энергии и массы жидкости $\psi=\text{ж}$, пара $\psi=\text{п}$ и воздуха $\psi=\text{в}$ в теле соответственно равны $\mathbf{j}^D = -\lambda \nabla T + \sum_{\psi} E_{\psi} \mathbf{j}_{\psi}^D$ и $\mathbf{j}_{\psi}^D = -D_{\psi} (\nabla U_{\psi} + \delta_{\psi}^T \nabla T)$, где $E_{\psi}, D_{\psi}, U_{\psi}, \delta_{\psi}^T$ — внутренняя энергия, коэффициент диффузии, объемная концентрация, относительный коэффициент тер-

модиффузии компонента ψ . Коэффициент диффузии для жидкой фазы находится по формуле Н.И. Никитенко [6]: $D_{\text{ж}} = \gamma_{D\text{ж}} [\exp(A_D / RT) - 1]^{-1}$, а для газовой фазы — по формуле [1]: $D_{\text{п}} = D_{\text{в}} = \gamma_{D\text{п}} T^{3/2} / P_{\text{г}}$, где R — универсальная газовая постоянная, A_D — энергия активации для процесса диффузии; $P_{\text{г}}$ — давление газовой фазы; $\gamma_{D\text{ж}}$, $\gamma_{D\text{п}}$ — диффузионные коэффициенты. Плотности фильтрационных потоков жидкости, пара и воздуха равны: $\mathbf{j}_{\text{ж}}^{\Phi} = U_{\text{ж}} \mathbf{w}_{\text{ж}}$, $\mathbf{j}_{\text{п}}^{\Phi} = U_{\text{п}} \mathbf{w}_{\text{г}}$, $\mathbf{j}_{\text{в}}^{\Phi} = U_{\text{в}} \mathbf{w}_{\text{г}}$. При наличии фильтрации, компоненты вещества перемещаются со скоростью $\mathbf{w} = \mathbf{w}_L + \mathbf{w}_{\psi}$, $\mathbf{w}_L$ — скорость ленты. Скорости фильтрации жидкой и газовой фаз находятся 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 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, т.е. $\partial W / \partial t = 0$ и $\partial \varepsilon_V / \partial t = 0$. Скорость перемещения материала w_L в аппарате постоянна. Обычно толщина высушиваемого слоя $X_{\text{м}}$ существенно меньше длины Z и ширины Y ленты аппарата. С учетом принятых допущений система, описывающая тепло- и массообмен, фазовые превращения и деформирование при непрерывной диффузионной сушке слоя коллоидного капиллярно-пористого материала, имеет следующий вид

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

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

$$c_{\text{эф}} w_L \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial x}) - \sum c_{\psi} D_{\psi} \left(\frac{\partial U_{\psi}}{\partial x} + \delta_{\psi} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - L I_V, \quad \psi = \text{ж, п, в}. \quad (5)$$

Здесь $c_{\text{эф}}$, $\lambda_{\text{эф}}$ — эффективные теплоемкость и теплопроводность тела, $c_{\text{эф}} = c_{\text{т}} U_{\text{т}} + c_{\text{ж}} U_{\text{ж}} + c_{\text{п}} U_{\text{п}} + c_{\text{в}} U_{\text{в}}$, $\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{т}} U_{\text{т}} / \rho_{\text{т}} + \lambda_{\text{ж}} U_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}} + \lambda_{\text{п}} U_{\text{п}} / \rho_{\text{п}} + \lambda_{\text{в}} U_{\text{в}} / \rho_{\text{в}}$; I_V — интенсивность испарения жидкости в порах тела; L — удельная теплота испарения жидкости; δ_{ψ}^T — относительный коэффициент термодиффузии компонента ψ . Вторым членом правой части уравнения (5), обычно можно пренебречь [3].

Интенсивность испарения жидкости на внешней поверхности пористого тела [6] пропорциональна разности потоков испаряющейся и конденсирующейся жидкости

$$I = \gamma_{\text{с}} \left\{ \varphi_{\text{т}} \left(\exp \left[A / (RT) \right]_{v=0} \right) - 1 \right\}^{-1} - \varphi_{\text{с}} \left(\exp \left[A / (RT_{\text{с}}) \right] - 1 \right)^{-1}, \quad (6)$$

где $\gamma_{\text{с}} = \varepsilon \rho_{\text{ж}} \delta^* / 4$ — коэффициент поверхностного испарения; ε — коэффициент излучения; δ^* — средняя длина диффузионного перескока активизированной частицы внутри конденсированного слоя; $\varphi_{\text{т}}$ — влажность тела, представляющая собой относительную влажность парогазовой смеси, которой согласно изотерме десорбции отвечает объемная концентрация $U_{\text{ж}}$ в данной точке тела; v — нормаль к поверхности; $T_{\text{с}}$ и $\varphi_{\text{с}}$ — температура и относительная влажность внешней среды; A — энергия активации.

Парциальное давление пара из уравнения состояния равно $P_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} RT / \mu_{\text{п}}$, где парциальная плотность пара $\rho_{\text{п}} = U_{\text{п}} / \Psi_{\text{г}}$. Объемная доля газовой фазы $\Psi_{\text{г}} = 1 - \Psi_{\text{т}} - \Psi_{\text{ж}}$, объемные доли скелета тела $\Psi_{\text{т}} = 1 - \Pi$ и жидкой фазы $\Psi_{\text{ж}} = U_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}}$, где Π — пористость. Давление насыщения $P_{\text{н}}$ определяется по формуле Никитенко Н.И. [7]: $P_{\text{н}} = N_{\text{п}} \sqrt{T} [\exp(A / RT) - 1]^{-1}$, $N_{\text{п}} = \text{const}$, которая хорошо согласуется с табличными данными.

Интенсивность испарения жидкости в порах тела рассчитывается по формуле, которая вытекает из формулы (6) при условии, что температуры фаз в каждой точке тела совпадают

$$I_V = \gamma_{\text{с}} [\exp(A / RT) - 1]^{-1} (\varphi_{\text{т}} - \varphi) S, \quad (7)$$

где S — суммарная площадь контакта жидкой и газовой фаз в частично заполненных жидкостью капиллярах. Для определения функции S получена формула [8]: $S = \frac{2\sqrt{1 - \varphi_{\text{т}}}}{\rho_{\text{ж}} \delta^*} \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial \varphi_{\text{т}}}$, в которой производная

$\partial U_{\text{ж}} / \partial \varphi_{\text{т}}$ определяется путем дифференцирования уравнения изотермы десорбции. Если изотерма задана в виде $U_{\text{ж}} = U_{\text{max}} \varphi_{\text{т}}^g$, $g = \text{const}$, то $\partial U_{\text{ж}} / \partial \varphi_{\text{т}} = U_{\text{max}} g \varphi_{\text{т}}^{g-1}$. Данные по равновесному влагосодержанию свеклы [9] достаточно хорошо описываются уравнением $W_{\text{р}} = 0,5 W_{\text{max}} [\varphi / (1 - \varphi)]^{2/3}$, где $W = U_{\text{ж}} / \rho_{\text{т}} (1 - \Pi)$.

На границе контакта влажного материала и сушильного агента ($x = X_m$) для уравнений (1) – (3) условия тепло- и массообмена записываются следующим образом

$$D_{ж} \frac{\partial U_{ж}}{\partial v} \Big|_{v=0} = -I, \quad (8)$$

$$D_{п} \frac{\partial U_{п}}{\partial v} \Big|_{v=0} = I - \gamma_{пс} (U_{п}|_{v=0} - \rho_{пс} \Psi_{г}) , \quad (9)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial v} \Big|_{v=0} = \alpha (T_c - T|_{v=0}) - LI - [\gamma_{пс} (U_{п}|_{v=0} - \rho_{пс} \Psi_{г}) \epsilon_{п} + \gamma_{вс} (U_{в}|_{v=0} - \rho_{вс} \Psi_{г})] (T_c - T|_{v=0}) , \quad (10)$$

где $T|_{v=0}$ — температура на поверхности слоя; T_c — средняя температура сушильного агента в сечении z .

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

Изменение давления ΔP_c в сечении z находится из уравнения Бернулли для течения газа в канале

$$\Delta P_c = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} + \Delta P_{c3}, \quad (11)$$

где $\Delta P_{c1} = \lambda_{тр} \rho_c w_c^2 \Delta z / 2d_{эКВ}$ — потери напора, вызванные трением; $\Delta P_{c2} = \zeta \rho_c w_c^2 / 2$ — потери, обусловленные местными сопротивлениями; $\Delta P_{c3} = \rho_c g \Delta z$ — статический напор газового потока. Коэффициент трения $\lambda_{тр}$ зависит от режима течения газа [10]: $\lambda_{тр} = 64/Re$ при $Re < 2320$; $\lambda_{тр} = 64/Re + 0,136/Re^{0,18}$ при $Re = 2320 - 10^6$. Эквивалентный диаметр $d_{эКВ} = 2S_c / \Pi_c = XY / (X + Y)$, где $\Pi_c = 2(X + Y)$ — периметр сечения канала.

Пренебрегая местными сопротивлениями, дифференциальное уравнение потери напора в канале имеет вид

$$\frac{dP_c}{dz} = -\lambda_{тр} \rho_c \frac{w_c^2}{2d_{эКВ}} + \rho_c \cos(g, z), \quad (12)$$

Средняя температура теплоносителя T_c по сечению z определяется из уравнения баланса энергии для элементарного объема $dV = S_c dz$ канала, контактирующего с сушильным агентом на поверхности Ydz :

$$dq_c / dz = [\alpha - \gamma_{пс} (U_{п}|_{v=0} - \rho_{пс} \Psi_{г}) \epsilon_{п} - \gamma_{вс} (U_{в}|_{v=0} - \rho_{вс} \Psi_{г}) \epsilon_{в}] (T_c - T|_{v=0}) - LI_c Y, \quad (13)$$

где q_c — поток энергии через сечение z канала, $q_c(z) = [G_{пс}(z)c_{п} + G_{вс}(z)c_{в}]T_c(z)$, $c_{п}$, $c_{в}$ — удельные теплоемкости пара и воздуха.

Средняя скорость w_c сушильного агента в сечении z канала, в соответствии с уравнениями состояния и неразрывности для пара и воздуха, находится по формуле

$$w_c(z) = \left[\frac{G_{пс}(z)}{\mu_{п}} + \frac{G_{вс}(z)}{\mu_{в}} \right] \frac{RT_c(z)}{P_c(z)S_c} \quad (14)$$

Изменение расходов компонентов теплоносителя в сечение z из уравнений баланса массы равны:

$$dG_{вс}(z)/dz = \gamma_{вс} [\rho_{в}(z, X) - \rho_{вс}(z) \Psi_{г}] Y, \quad dG_{пс}(z)/dz = \gamma_{пс} [\rho_{п}(z, X) - \rho_{пс}(z) \Psi_{г}] Y, \quad (15)$$

где $\rho_{пс}$, $\rho_{вс}$ — парциальные плотности паровой и воздушной составляющих, $\rho_{пс} = U_{пс}$, $\rho_{вс} = U_{вс}$.

Расходы воздуха $G_{вс}(z)$ и пара $G_{пс}(z)$ в сушильном агенте через сечение z сушильной камеры

$$G_{пс}(z) = w_c S_c \rho_{пс}(z), \quad G_{вс}(z) = w_c S_c \rho_{вс}(z), \quad (16)$$

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

$$G_{с0} = G_{пс0} + G_{вс0} = w_{с0} S_{с0} (U_{пс0} + U_{вс0}), \quad (17)$$

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

$$G_c(z) = G_{пс}(z) + G_{вс}(z) = w_c S_c [\rho_{пс}(z) + \rho_{вс}(z)], \quad (18)$$

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

$$G_{м0} = G_{т0} + G_{ж0} + G_{п0} + G_{в0} = w_L S_m (U_{т0} + U_{ж0} + U_{п0} + U_{в0}), \quad (19)$$

где $S_m = X_m Y$ — площадь сечения слоя материала, а общий его расход $G_m(z)$ через сечение z равен

$$G_m(z) = w_L S_m [\bar{U}_t(z) + \bar{U}_ж(z) + \bar{U}_п(z) + \bar{U}_в(z)], \quad (20)$$

где $\bar{U}_\psi(z)$ — среднее значение объемной концентрации компонента ψ ($\psi = t, ж, п, в$) 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, тогда суммарный расход материала и сушильного агента в произвольном сечении системы материал – сушильный агент остается неизменным, т.е. $G_m(z) + G_c(z) = G_{m0} + G_{c0} = const$. При этом расход пара сушильного агента через сечение z канала согласно уравнению баланса массы равен

$$G_{пс}(z) = w_c S_c \rho_{пс}(z) = G_{m0} + G_{c0} - G_m(z) - G_{вс}(z), \quad (21)$$

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

$$\rho_{пс}(z) = G_{пс}(z) / [w_c(z) S_c], \quad \rho_{вс}(z) = G_{вс}(z) / [w_v(z) S_v], \quad (22)$$

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

$$P_{пс}(z) = R \rho_{пс}(z) T_c(z) / \mu_{пс}, \quad P_{вс}(z) = R \rho_{вс}(z) T_c(z) / \mu_{вс}, \quad (23)$$

где μ — молярная масса.

Уравнения (1) – (3) решались численным методом на базе трехслойной явной разностной схемы Никитенко Н.И. [4] и процедуры расщепления алгоритма по физическим факторам. В декартовых координатах $x=x_1, y=x_2, z=x_3$ на неравномерной разностной сетке $x_{i+1}^n = x_i^n + h_{x,i+1}^n$ ($i=0,1,\dots,I$), $y_{m+1}^n = y_m^n + h_{y,m+1}^n$ ($m=0,1,\dots,M$), $z = nl$ ($n=0,1,\dots; l>0$) разностная аппроксимация уравнения (3) представляется в виде

$$(1 + \Omega_{ж}) \delta_z \bar{U}_{ж} - \Omega_{ж} \delta_z U_{ж}^{n-1} = \frac{1}{w_L} \sum_{k=1}^3 [\delta_{x_k} (D_{ж} \delta_{x_k} U_{ж}) + \delta_{x_k} (D_{ж} \delta_{ж}^T \delta_{x_k} T)] - I_V, \quad (24)$$

$$\delta_z \bar{U}_{ж} = \frac{\bar{U}_{ж}}{1 + \varepsilon_V} \delta_z \varepsilon_V, \quad (25)$$

Сеточные функции в (24), (25) $U_{ж,im}^n, U_{ж,im}^{n-1}$ и $\bar{U}_{ж,im}^{n+1}$ для узловой точки (x_i, y_m, z) записаны для простоты без индексов, соответственно $U_{ж}, U_{ж}^{n-1}$ и $\bar{U}_{ж}$. Производные для случая двумерной задачи $U_{ж} = U_{ж}(x, y)$ определяются разностными отношениями: $\delta_z U_{ж} = (U_{ж,im}^{n+1} - U_{ж,im}^n) / l$; $\delta_{x_1} U_{ж} = (U_{ж,i+1}^n - U_{ж,i-1}^n) / 2h_x$; $\delta_z \bar{U}_{ж} = (\bar{U}_{ж,im}^{n+1} - U_{ж,im}^n) / l$; $\delta_{x_1} (D_{ж} \delta_{x_1} U_{ж}) = \frac{1}{2h_x^2} [(D_{ж,i+1}^n + D_{ж,i}^n) (U_{ж,i+1}^n - U_{ж,i}^n) - (D_{ж,i}^n - D_{ж,i-1}^n) (U_{ж,i}^n - U_{ж,i-1}^n)]$. Погрешность аппроксимации $O(l + h_x^2 + h_y^2)$. Весовой параметр $\Omega_{ж} \geq 0$ устраняет ограничения на шаг по времени. Его значение выбирается исходя из условия устойчивости $l \leq (1 + 2\Omega_{ж}) [2D_{ж} (1/h_x^2 + 1/h_y^2)]^{-1}$.

Разностные аппроксимации обыкновенных дифференциальных уравнений (12), (13), (15) имеют вид

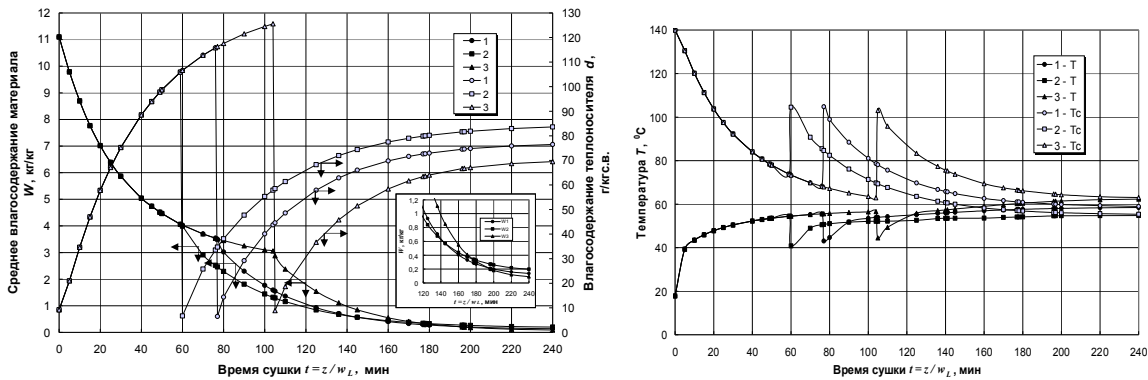
$$P_c^{n+1} = P_c^n - \lambda_{тр} \rho_c^n (w^n)^2 / (2d_{эжв}) + \rho_c^n \cos(g, z), \quad (26)$$

$$T_c^{n+1} = \left(T_c^n (G_{пс} c_{пс} + G_{вс} c_{вс}) + h_x Y \{ \alpha - \gamma_{пс} (U_{пл}^n - \rho_{пс}^n \Psi_{гп}^n) c_{пс} - \right. \\ \left. - \gamma_{вс} (U_{вл}^n - \rho_{вс}^n \Psi_{гв}^n) c_{вс} \} (T_c^n - T_l^n) - LI_c \right) / (G_{пс} c_{пс} + G_{вс} c_{вс}), \quad (27)$$

$$G_{вс}^{n+1} = G_{вс}^n + \gamma_{вс} (\rho_{вл}^n - \rho_{вс}^n \Psi_{гв}^n) Y, \quad G_{пс}^{n+1} = G_{пс}^n + \gamma_{пс} (\rho_{пл}^n - \rho_{пс}^n \Psi_{гп}^n) Y, \quad (28)$$

На базе данной математической модели и метода расчета разработан программный комплекс, позволяющий рассчитывать изменение во времени температуры T_c , влагосодержания d_c и ряда других параметров сушильного агента, а также динамику тепломассоререноса в высушиваемом материале. Об адекватности математической модели и эффективности численного метода свидетельствует сопоставление расчетных и экспериментальных данных [2], а также то, что в каждый момент времени значения $T_c, d_c, P_{пс}$ и ϕ_c соотносятся на $I-d$ диаграмме влажного воздуха. На рис.1 представлены графики среднего влагосодержания сушильного агента d_c и столовой свеклы W (а), температуры сушильного агента T_c и поверхности слоя $T|_{v=0}$ (б), высушиваемого предложенным конвективно-конденсационным способом для случаев окончания первого этапа сушки по достижении давления пара $P_{пс}$ в сушильном агенте значений 15 кПа (кривые 1), 16 кПа (кривые 2), 17 кПа (кривые 3), его осушки до $P_{пс} = 1$ кПа и дополнительного подогрева до $T_c = 105^\circ \text{C}$ на втором этапе. Осушка теплоносителя на втором этапе приводит к интенсивному испарению влаги с поверхностных слоев материала, что сопровождается достаточным резким снижением температуры на его поверхности. Поэтому целесообразно дополнительно нагревать осушенный теплоноситель на входе во вторую зону сушильной камеры. Увеличение продолжительности первого этапа сушки (кривые 2, 3) позволяет досушить материал до более низкого равновесного влагосодержания W_p на вто-

ром 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.



а) Влажность теплоносителя d и слоя столовой свеклы W б) Температура слоя $T|_{v=0}$ и сушильного агента T_c

Рис. 1 – Графики изменения влагосодержания (а) и температуры (б) теплоносителя и слоя столовой свеклы толщиной $H = 12,5$ мм при обезвоживании в двухзонной прямоточной ленточной сушилке

Представленные графики вместе с заданными исходными параметрами определяют в соответствии с предложенным способом режим сушки термолabileного материала в ленточной сушилке. Для реализации конвективно-конденсационного способа непрерывной сушки предложена технологическая схема ленточной сушильной установки, представленная на рисунке 2

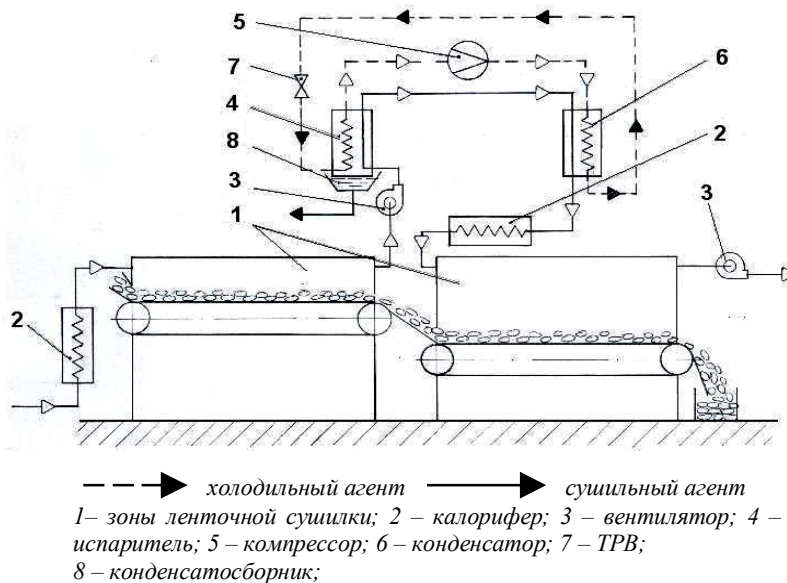


Рис. 2 – Схема сушильной установки ленточного типа

Установка содержит последовательно соединенные две зоны 1 с размещенными в них конвейерными лентами, калориферы 2, подогревающие сушильный агент, подаваемый в первую и вторую зоны, вентиляторы 3, отсасывающие теплоноситель на выходе из каждой зоны, а также тепловой насос, в котором циркулирует хладагент и который включает испаритель 4, компрессор 5, нагреватель-конденсатор 6, терморегулирующий (дроссельный) вентиль (ТРВ) 7 и конденсатосборник 8.

Ленточная сушилка работает следующим образом. На первом этапе, в первую зону подается сушильный агент с заданной скоростью, влагосодержанием и давлением, нагретый в калорифере 2 до температуры T_{c0} , которая существенно выше предельно допустимой T^* для данного материала. Начальное давление сушильного агента определяется мощностью вентилятора 3, установленного после первой зоны сушилки. После прохождения первой зоны первый этап сушки завершается. При этом температура на внешней границе тела приближается к значению T^* , а парциальное давление пара в сушильном агенте и соответственно влагосодержание достигает значения, при котором изменение влагосодержания на по-

верхности материала, контактирующей с сушильным агентом, практически не наблюдается. Далее материал пересыпается на ленту второй зоны, в ходе чего происходит его перемешивание и выравнивание влажности по толщине слоя. Хладагент, сжатый в компрессоре 5 до давления насыщения, подается в конденсатор 6, где в результате фазового превращения отдает теплоту сушильному агенту. После этого хладагент дросселируется через ТРВ 7 до давления, при котором попадает в охладитель-испаритель 4 и испаряется за счет теплоты отработанного после первой зоны сушильного агента. Сушильный агент в испарителе 4 охлаждается ниже точки росы, пары влаги, что в нем содержатся, конденсируются и конденсат отводится в конденсатосборник 8. Затем воздух попадает в нагреватель-конденсатор теплового насоса 6, где за счет теплоты конденсации холодильного агента нагревается до температуры 60–70 °С, а проходя через калорифер 2, повышает свою температуру до найденной из расчета температуры подачи во вторую зону. Эта температура выбирается максимально возможной, но чтобы ее влияние не допустило перегрева тела на втором этапе выше значения T^* . Давление сушильного агента на входе во вторую зону определяется мощностью вентилятора 3, установленного на выходе из этой зоны.

Выводы. Разработана технологическая схема двухзонной прямоточной ленточной сушильной установки, позволяющая реализовать предложенный энергоресурсосберегающий конвективно-конденсационный способ непрерывной сушки термолабильных материалов, в которой предполагается подогрев сушильного агента с помощью паровых калориферов и осушения с помощью теплового насоса. Затраты энергии на 1 кг выпаренной влаги составляют 3200 кДж, что на 10–15 % меньше, чем в существующих ленточных сушильных установках без теплового насоса.

Литература

1. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. –М.: Химия. –1980. –248 с.
2. Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н., Шапарь Р.А. Энергоресурсосберегающий способ сушки термолабильных материалов в ленточной сушильной установке непрерывного действия // Наукові праці ОНАХТ (Одеської національної академії харчових технологій). – 2014. –Вип. 45. –Т.2. – С. 117 – 124.
3. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки с целью оптимизации процесса сушки термолабильных материалов // ИФЖ. 2005. – Т. 78, – № 1. – С. 74 – 87.
4. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. –Киев: Наук. Думка. –1983. –352 с.
5. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Математическая модель и метод расчета тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки в процессах сушки // Доповіді НАН України. – 2002. – № 9, – С. 81–89.
6. Никитенко Н.И. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидких средах // ИФЖ. 2000, – Т. 73, – № 4. – С. 851 – 860.
7. Никитенко Н.И. Исследование динамики испарения конденсированных тел на основе закона интенсивности спектрального излучения частиц// ИФЖ. 2002. – Т.75, – № 3, – С. 128 – 134.
8. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Развитие теории и методов расчета динамики сорбции и десорбции. // ИФЖ. 2010. – Т. 83, – № 3, – С. 779 – 789.
9. Гинзбург А.С., Громов М.А. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов. –М.: Агропромиздат. –1987. –273 с.
10. Шлипченко З. С. Насосы, компрессоры и вентиляторы. –Киев: Техника. –1976. –368 с.