Теплофизика и аэромеханика, 2008, том 15, № 4

УДК 536.37

Математическое моделирование сушки влажного пористого материала в диффузионном приближении

У.Р. Ильясов[1], Д.Е. Игошин[2]

[1] *Филиал Южно-Уральского государственного университета, Нижневартовск*

[2] *Стерлитамакская государственная педагогическая академия*

E-mail: navydimka@rambler.ru

Рассмотрена задача о сушке пористого проницаемого материала. Построены автомодельные решения для процесса диффузионного переноса влаги. Исследована зависимость интенсивности сушки от исходного состояния пористой среды, а также параметров внешнего воздействия.

Ключевые слова: математическое моделирование, сушка, тепломассоперенос, пар, вода, влагосодержание, пористость, диффузия, теплопроводность, автомодельная задача, пристрелка.

Основные уравнения, описывающие процессы тепломассопереноса при тепловом воздействии на пористые среды, получили название уравнений Лыкова [1]. Они описывают режим мягкой сушки при малых тепловых потоках, когда температура сушки не превышает 50–70 °С, что ниже температуры кипения воды. Наиболее распространенным способом интенсификации процесса сушки материалов является повышение температуры среды, что достигается сушкой в перегретом паре [2]. При этом процесс сушки сопровождается повышением внутреннего избыточного давления водяного пара и перемещением вглубь тела области фазового перехода. В этих случаях необходимо численное решение системы уравнений Лыкова. Наиболее простые модели рассмотрены в работах [3, 4]. В работе [5] рассмотрена задача тепломассопереноса, сопровождаемая углублением зоны испарения при сушке. Получены аналитические решения, однако при решении задачи пренебрегалось градиентами переноса во влажной зоне тела, а также полагалось, что подводимая за счет теплопроводности сухого слоя теплота целиком расходуется на испарение воды. Отметим, что это может происходить только при начальной температуре тела, очень близкой к температуре насыщения воды. В работе [6] предложена система дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса тепла и влаги в капиллярно пористых телах, которая замыкается при помощи определений диффузионных потоков тепла и массы, рекомендованных в работе [1], а также уравнения состояния без анализа влияния структурных характеристик пористого тела на закономерности переноса. Для малых значений числа Пекле, меньших 0,1, когда конвективным переносом массы можно пренебречь по сравнению с диффузионным, время сушки тел с характерным размером $L \approx 10^{-2}$ м при коэффициенте диффузии $10^{-9} \div 10^{-6}$ м²/с должно быть $10^{3} \div 10^{6}$ с, т. е. данный подход применим только для относительно мягких режимов сушки.

Следует отметить, что в зависимости от параметров внешнего воздействия и исходного состояния материала могут реализоваться различные режимы сушки, вплоть до увлажнения. В настоящей работе рассматриваются некоторые особенности процессов тепломассопереноса при конвективной сушке влажной пористой среды в одномерной постановке.

1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для теоретического описания процессов тепломассопереноса при нагреве пористой среды примем следующие допущения. Будем полагать, что температура пористой среды и насыщающей парогазоводяной смеси в каждой точке совпадают, скелет пористой среды несжимаем и неподвижен, т. е. усадкой материала пренебрегаем. Испарение происходит полностью внутри пор, перенос влаги происходит в газофазном режиме, а жидкая фаза неподвижна. В этом случае можно пренебречь гидравлическим сопротивлением пористой среды. Будем полагать, что суммарное давление парогазовой смеси p, состоящее из парциальных давлений пара p_v и воздуха p_a, однородно. Причем каждый из компонентов (пар и воздух) является калорически совершенным:

$$p = p_v + p_a, \quad p_v = \rho_v \frac{R}{\mu_v} T, \quad p_a = \rho_a \frac{R}{\mu_a} T, \tag{1.1}$$

где R — универсальная газовая постоянная, ρ_i, μ_i ($i = v, a$) — парциальные плотности и молярные массы компонентов. Нижние индексы v и a соответствуют пару и воздуху.

Во влажной зоне фазовые переходы происходят в равновесном режиме, т. е. парогазовая смесь находится при точке росы, поэтому парциальное давление пара p_v равно давлению насыщенного пара $p_s(T)$, соответствующего текущей температуре T($p_v = p_s(T)$). Для зависимости $p_s(T)$ будем использовать выражение [7]

$$p_s(T) = p_* \exp\left(-\frac{T_*}{T}\right), \tag{1.2}$$

где p_* и T_* — эмпирические параметры, определяемые на основе табличных данных. Тогда во влажной зоне парциальные плотности пара и воздуха однозначно определяются через текущую температуру T:

$$\rho_v = \frac{\mu_v p_s(T)}{RT}, \quad \rho_a = \frac{\mu_a \left(p - p_s(T)\right)}{RT}. \tag{1.3}$$

В рамках принятых допущений уравнение сохранения массы для воды и пара примет вид

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[m(1-S_l)\rho_v + mS_l\rho_l\right] + \frac{\partial\left(m(1-S_l)\rho_v \mathrm{v}_v\right)}{\partial x} = 0, \tag{1.4}$$

где m — пористость, $m(1-S_1)$ — часть порового объема, занятая подвижной фазой или "живая" пористость, ρ_i ($i = l, v$) — плотности фаз, S_l — объемное влагосодержание в порах, v_v — скорость пара, нижние индексы l, v, r здесь и далее соответствуют воде (liquid — жидкость), пару (vapor) и пористому скелету (rubber — резина).

Для процесса диффузионного переноса газовой фазы примем закон Фика

$$\rho_v v_v = -D\frac{\partial \rho_v}{\partial x}, \tag{1.5}$$

где D — коэффициент диффузии.

Уравнение теплового баланса, пренебрегая конвективным переносом и баротермическим эффектом, запишем в виде:

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + ml\rho_{l0}\frac{\partial S_l}{\partial t}, \tag{1.6}$$

$$\rho c = (1-m)\rho_r c_r + m\rho_l c_l S_l, \quad \lambda = (1-m)\lambda_r + m\lambda_l S_l.$$

Здесь T — температура, ρc — удельно-объемная теплоемкость, λ — коэффициент теплопроводности системы пористая среда–вода, l — удельная теплота парообразования воды, c_i, λ_i — удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности фаз ($i = r$, l), Последнее слагаемое в (1.6) соответствует тепловому эффекту фазовых переходов во влажной зоне. В сухой зоне ($0 < x < x_{(s)}$) это слагаемое равно нулю.

Приведенные выше уравнения необходимо дополнить соотношениями на границе сухой и влажной зон ($x = x_{(s)}$), следующими из условий баланса тепла и массы:

$$\begin{gathered}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)^+_{(s)} - \left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)^-_{(s)} = ml\rho_l S_{l(s)}\dot{x}_{(s)}, \qquad \dot{x}_{(s)} = \frac{dx_{(s)}}{dt}, \\ \rho_v\left(\mathrm{v}_v^+ - \dot{x}_{(s)}\right)\left(1-S_{l(s)}\right) - \rho_v\left(\mathrm{v}_v^- - \dot{x}_{(s)}\right) = \rho_l S_{l(s)}\dot{x}_{(s)}.\end{gathered} \tag{1.7}$$

Здесь нижний индекс s соответствует значениям параметров на границе. На этой границе температура, а также плотность пара и воздуха полагаются непрерывными, а водонасыщенность может терпеть разрыв:

$$T^- = T^+ = T_{(s)}, \quad \rho_i^- = \rho_i^+ = \rho_{i(s)},$$

где $i = r_g l$.

Кроме того, на границе сухой и влажной зон парциальная плотность пара и температура связаны условием фазового равновесия, следующим из (1.3):

$$\rho_{v(s)} = \frac{\mu_v p_*}{RT_{(s)}}\exp\left(-\frac{T_*}{T_{(s)}}\right). \tag{1.8}$$

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим одномерную задачу о нагреве пористой среды через проницаемую границу. Пусть в исходном состоянии пористая среда содержит жидкость с объемным влагосодержанием S_l и находится при температуре T_0.

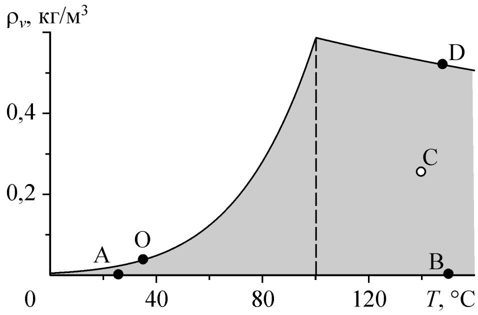

Рис. 1. Фазовая диаграмма температура–плотность пара для различных начально-граничных условий.

Внутрипоровое давление будем полагать равным атмосферному. На границе ($x = 0$) пористая среда начинает обдуваться паровоздушной смесью с температурой T_e и парциальной плотностью пара ρ_{ve}. На рис. 1 приведена фазовая диаграмма возможных состояний пара на плоскости T, ρ_v (затемненная область на диаграмме) при полном давлении паровоздушной смеси p. Влажной зоне соответствует область $T \le T_b$, где T_b — температура кипения при давлении p. Участок $T \ge T_b$ соответствует состоянию чистого перегретого пара, находящегося под давлением p.

Пусть точка O, лежащая на линии (1.8), соответствует начальному состоянию пористой среды. Точки A, B, C, D соответствуют различным случаям внешнего воздействия. В частности, точки A и B соответствуют случаю, когда пористая среда обдувается сухим ($\rho_{ve} = 0$) холодным ($T_e < T_0$) или горячим ($T_e > T_0$) воздухом, точка C — перегретой паровоздушной смесью, D — перегретым паром ($T_e > T_b$). С учетом вышеотмеченного начальные и граничные условия можно записать в виде:

$$\begin{aligned} &S_l = S_{l0}, \quad T = T_0 \quad (x \ge 0, \quad t = 0), \\ &\rho_v = \rho_{ve}, \quad T = T_e \quad (x = 0, \quad t > 0). \end{aligned} \tag{2.1}$$

Будем искать автомодельное решение данной задачи. Введем безразмерные температуру, плотность и автомодельную переменную:

$$\Theta = \frac{T}{T_0}, \quad \tilde{\rho} = \frac{\rho_v}{\rho_{v0}}, \quad \xi = \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}, \quad \kappa = \frac{\lambda}{\rho c},$$

где κ — коэффициент температуропроводности системы.

Тогда уравнения тепломассопереноса примут вид:

$$\frac{d^2\tilde{\rho}}{d\xi^2} = -\frac{2\xi}{Le}\frac{d\tilde{\rho}}{d\xi}, \qquad \frac{d^2\Theta}{d\xi^2} = -2\xi\frac{d\Theta}{d\xi}, \qquad 0 < \xi < \xi_{(s)}, \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\Theta_* - 1}{\Theta}\frac{d^2\Theta}{d\xi^2} + \frac{\Theta_*^2 - 4\Theta_* + 2}{\Theta^2}\left(\frac{d\Theta}{d\xi}\right)^2 = -\frac{2\xi}{Le}\frac{\tilde{\rho}_l}{1 - S_l}\frac{dS_l}{d\xi}, \\ &\frac{d^2\Theta}{d\xi^2} = -2\xi\left(\frac{d\Theta}{d\xi} - \frac{m}{Ja}\frac{dS_l}{d\xi}\right), \qquad \tilde{\rho} = \frac{1}{\Theta}\exp\left(\Theta_* - \frac{\Theta_*}{\Theta}\right), \qquad \xi_{(s)} < \xi < \infty. \end{aligned} \tag{2.3}$$

На границе сухой и влажной зон ($\xi = \xi_{(s)}$) имеем:

$$\begin{aligned} &\left(\frac{d\tilde{\rho}}{d\xi}\right)_{(s)}^{-} - \left(1 - S_{l(s)}\right)\left(\frac{d\tilde{\rho}}{d\xi}\right)_{(s)}^{+} = \frac{2}{\mathrm{Le}}\tilde{\rho}_l S_{l(s)}\xi_{(s)}, \\ &\left(1 + \frac{m}{1-m}\tilde{\lambda}S_{l(s)}\right)\left(\frac{d\Theta}{d\xi}\right)_{(s)}^{+} - \left(\frac{d\Theta}{d\xi}\right)_{(s)}^{-} = \frac{2}{Ja}\frac{m}{1-m}S_{l(s)}\xi_{(s)}. \end{aligned} \tag{2.4}$$

Безразмерные коэффициенты в уравнениях (2.2)–(2.4) имеют вид:

$$\mathrm{Le} = \frac{D}{\kappa}, \quad \mathrm{Ja} = \frac{\rho c T_0}{\rho_l L}, \quad \Theta_* = \frac{T_*}{T_0}, \quad \tilde{\rho}_l = \frac{\rho_l}{\rho_{v0}}, \quad \tilde{\lambda} = \frac{\lambda_l}{\lambda_r}.$$

Здесь Le — число Льюиса, Ja — число Якоба.

Систему уравнений (2.3) целесообразнее привести к виду, удобному для численных расчетов:

$$\begin{gathered}
\frac{d^2\Theta}{d\xi^2} = \left(\frac{\Theta_*^2 - 4\Theta_* + 2}{\Theta^2} \left(\frac{d\Theta}{d\xi} \right)^2 + \frac{2\xi\tilde{\rho}_l \mathrm{Ja}}{m(1-S_l)\mathrm{Le}} \frac{d\Theta}{d\xi} \right) \Bigg/ \left(\frac{\tilde{\rho}_l Ja}{m(1-S_l)\mathrm{Le}} + \frac{\Theta_* - 1}{\Theta} \right), \\
\frac{dS_l}{d\xi} = -\frac{\mathrm{Ja}}{m} \left(\frac{\Theta_*^2 - 4\Theta_* + 2}{2\xi\Theta^2} \left(\frac{d\Theta}{d\xi} \right)^2 - \frac{\Theta_* - 1}{\Theta} \frac{d\Theta}{d\xi} \right) \Bigg/ \left(\frac{\tilde{\rho}_l \mathrm{Ja}}{m(1-S_l)\mathrm{Le}} + \frac{\Theta_* - 1}{\Theta} \right).
\end{gathered} \tag{2.5}$$

Из начальных и граничных условий (2.1) следует:

$$\begin{gathered}
\Theta = \Theta_e, \quad \tilde{\rho} = \tilde{\rho}_e, \quad \xi = 0, \\
\Theta = 1, \quad S_l = S_{l0}, \quad \xi = \infty.
\end{gathered} \tag{2.6}$$

3. АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ

Уравнения (2.2), описывающие перенос пара и температуры в сухой зоне, могут быть проинтегрированы:

$$\begin{gathered}
\tilde{\rho} = \tilde{\rho}_e + \left(\tilde{\rho}_{(s)} - \tilde{\rho}_e \right) \int_0^{\xi} \exp\left(-\xi^2 / \mathrm{Le} \right) d\xi \Bigg/ \int_0^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\xi^2 / \mathrm{Le} \right) d\xi, \quad \tilde{\rho}_{(s)} = \frac{\rho_{v(s)}}{\rho_{v0}}, \\
\Theta = \Theta_e + \left(\Theta_{(s)} - \Theta_e \right) \int_0^{\xi} \exp\left(-\xi^2 \right) d\xi \Bigg/ \int_0^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\xi^2 \right) d\xi, \quad \Theta_{(s)} = \frac{T_{(s)}}{T_0}, \quad 0 < \xi < \xi_{(s)}.
\end{gathered} \tag{3.1}$$

После некоторых преобразований из соотношений (2.4) получим выражения, связывающие автомодельную координату границы $S_{l(s)}$ со значениями объемного влагосодержания $\xi_{(s)}$ и производной $(d\Theta/d\xi)^+$ на этой границе:

$$\begin{gathered}
\frac{m}{1-m} \frac{2}{\mathrm{Le}} \left(\tilde{\rho}_{(s)} \frac{\Theta_* - 1}{\Theta_{(s)}} - \tilde{\lambda}\tilde{\rho}_l \right) \xi_{(s)} S_{l(s)}^2 + \left(\frac{d\tilde{\rho}}{d\xi} \right)_{(s)}^- - \tilde{\rho}_{(s)} \frac{\Theta_* - 1}{\Theta_{(s)}} \left(\frac{d\Theta}{d\xi} \right)_{(s)}^- + \\
+ \left(\tilde{\rho}_{(s)} \frac{\Theta_* - 1}{\Theta_{(s)}} \left(\frac{d\Theta}{d\xi} \right)_{(s)}^- + \frac{m}{1-m} \tilde{\lambda} \left(\frac{d\tilde{\rho}}{d\xi} \right)_{(s)}^- - \frac{2}{\mathrm{Le}} \left(\tilde{\rho}_{(s)} \frac{\Theta_* - 1}{\Theta_{(s)}} \frac{m}{1-m} + \tilde{\rho}_l \right) \xi_{(s)} \right) S_{l(s)} = 0,
\end{gathered} \tag{3.2}$$

$$\left(\frac{d\Theta}{d\xi} \right)^+ = \frac{\left(\dfrac{d\Theta}{d\xi} \right)_{(s)}^- + \dfrac{m}{1-m} \dfrac{2}{\mathrm{Ja}} \xi_{(s)} S_{l(s)}}{1 + \dfrac{m}{1-m} \tilde{\lambda} S_{l(s)}}.$$

Таким образом, задача об определении полей температуры и влагосодержания сводится к решению систем уравнений (2.2) и (2.5), удовлетворяющих граничным условиям (2.6), а также условиям (3.2) на заранее неизвестной границе $\xi = \xi_{(s)}$. Численное решение этой системы осуществлялось методом пристрелки, заключающемся в следующем. Начиная с произвольной границы $\xi_{(s)}$ и температуры $\Theta_{(s)}$ будем решать задачу Коши для системы уравнений (2.5) при начальных условиях, определяемых из (3.2). Пристрелку — подбор значений $\xi_{(s)}$ и $\Theta_{(s)}$ — будем продолжать до выполнения второго условия (2.6)

На рис. 2 представлены распределения температуры (*a*), влагосодержания (*b*) и парциальной плотности пара (*c*) в пористой среде, полученные при различных значениях температуры: T_e = 160, 100, 20°C (линии *1*, *2*, *3*). Плотность пара на внешней границе $\rho_{ve} = 0$ (сухой воздух), начальная температура T_0 = 20 °C, исходная водонасыщенность $S_{l0} = 0{,}1$. Для остальных параметров, характеризующих исходное состояние пористой среды, здесь и далее приняты следующие значения: m = 0,5, p = 0,1 МПа, p_* = $1{,}1 \cdot 10^5$ МПа, T_* = 5186 K, ρ_l = 1000 кг/м^3, c_l = 4200 Дж/(кг·K), ρ_r = 925 кг/м^3, c_r = 1000 Дж/(кг·K), λ_r = 0,15 Вт/(м·K), λ_r = 0,65 Вт/(м·K), $l = 2{,}26 \cdot 10^6$ Дж/кг, $D = 2{,}05\left(\dfrac{T}{273}\right)^{2{,}072}$.

На рис. 2 видно, что основной перепад температур реализуется в ближней сухой зоне, а во влажной зоне тепло расходуется на фазовые переходы. Интенсификация процесса сушки путем увеличения температуры нагрева это может привести к перегреву материала (линия *1*). Кроме того, из рис. 2 следует, что при сушке сухим воздухом на границе сухой и влажной зон $\left(\xi = \xi_{(s)}\right)$ средняя плотность пара максимальна, а это приводит к тому, что диффузионный поток с границы зон направлен как наружу, так и внутрь. Это, наряду с удалением влаги из материала, приводит к частичному переносу пара вглубь, при этом наблюдается увеличение влагосодер-

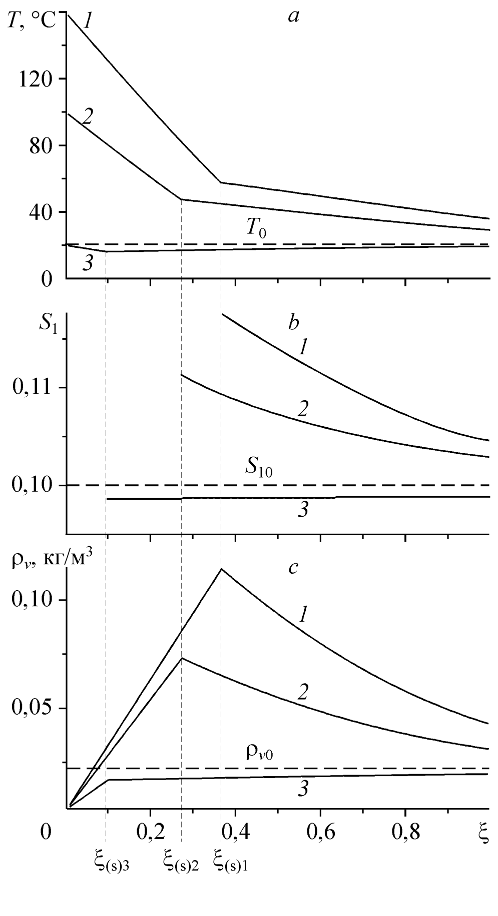

Рис. 2. Профили температуры (*a*), объемного влагосодержания (*b*) и плотности пара (*c*) при сушке сухим воздухом ($\rho_{ve} = 0$). Линии *1, 2* и *3* соответствуют T_e = 160, 100 и 20 °C, всюду концентрация пара снаружи равна нулю (на внешней границе — сухой воздух), T_0 = 20°*C*, S_{l0} = 0,1.

жания на границе зон (см. рис. 2, *b*, линии *1* и *2*). Следует отметить, что при сушке холодным воздухом (линия *3*) на границе зон образуется температурная яма, т. к. в этом случае фазовые переходы происходят за счет внутренней энергии.

На рис. 3 представлены распределения температуры (*a*), влагосодержания (*b*) и плотности пара (*c*) в пористой среде при сушке перегретым паром. Линии *1* и *2* получены при различных соответствующих значениях внешней температуры T_e = 160, 110 °С. В этом случае плотность пара на границе нагрева максимальна и влага переносится исключительно внутрь пористой среды. Это приводит к значительному увеличению влагосодержания на границе зон в отличие от сушки сухим воздухом (см. рис. 2), т. е. происходит увлажнение материала. Отметим, что при этом температура самого материала близка к температуре насыщения, т. е. происходит более интенсивный и глубокий прогрев пористой среды.

Режим сушки горячей пористой среды (T_0 = 90 °С) сухим воздухом представлен на рис. 4. Как видно, наблюдается увеличение протяженности сухой зоны и уменьшение водонасыщенности среды (линии *1*, *2*), т. е. происходит интенсификация процесса сушки. При этом вследствие интенсивных фазовых переходов в пористой среде реализуется температурная яма. При сушке холодным воздухом (линия *3*) происходит переохлаждение пара вблизи границы влажной зоны и частичная его конденсация.

Зависимость автомодельной координаты границы влажной зоны $\xi_{(s)}$, температуры на этой границе $T_{(s)}$, а также величина "горба" водонасыщенности $S_{l(s)} - S_{l0}$ от исходного влагосодержания S_{l0} при различных значениях температуры T_e представлены на рис. 5.

Вообще, множество решений определяется ограничениями на начальные параметры: исходное влагосодержание может принимать значение от 0 до 1, исходная температура — от 0 до 100°С, внешняя температура — от 0 до 160°С (температура растрескивания материала), плотность пара на внешней границе может варьировать от 0 до значения, определяемого плотностью насыщенного пара при 100°С.

Не для всяких начальных условий можно построить решение, непротиворечивое по отношению к принятым допущениям. Как видно из рис. 6, максимальное значение исходной температуры, при которой решение

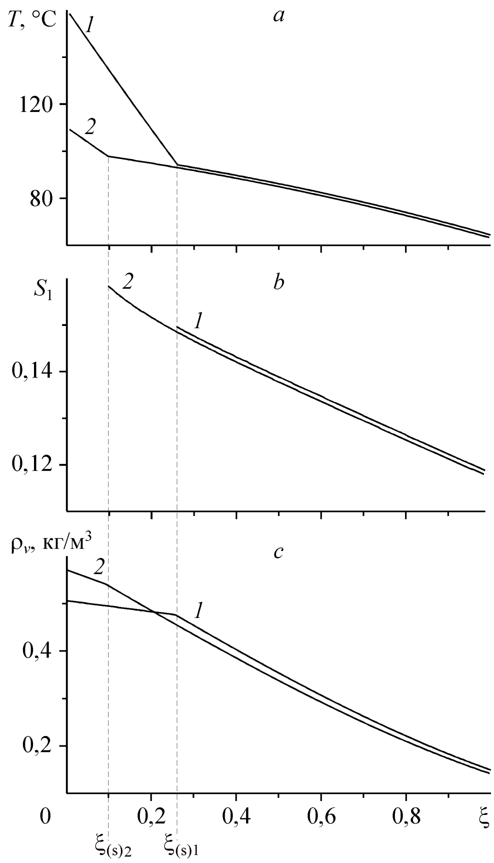

Рис. 3. Распределения температуры (*a*), влагосодержания (*b*) и плотности пара (*c*) в пористой среде при сушке перегретым паром. Линии *1* и *2* соответствуют T_e = 160 и 110 °С, T_0 = 20 °С, S_{l0} = 0,1.

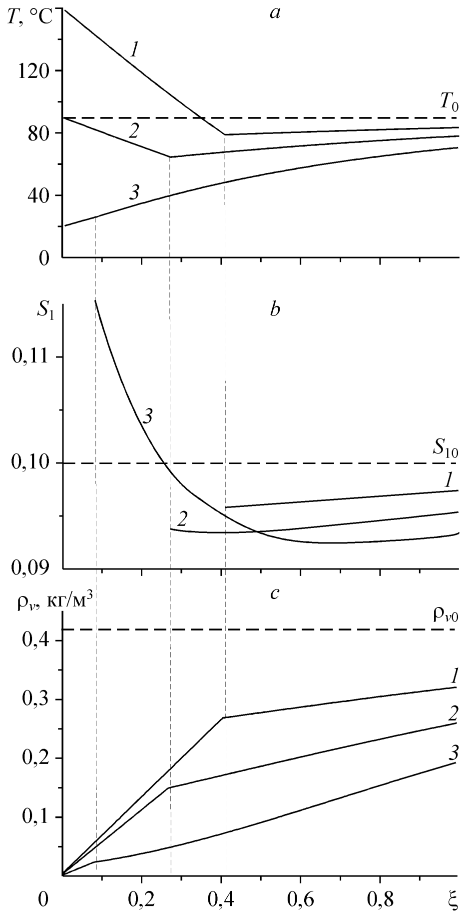

Рис. 4. Профили температуры (*a*), объемного влагосодержания (*b*) и плотности пара (*c*) при сушке горячей среды (T_0 = 90 °С, S_{l0} = 0,1) сухим воздухом ($\rho_{ve} = 0$). Линии *1*, *2* и *3* соответствуют T_e = 160, 90 и 20 °С.

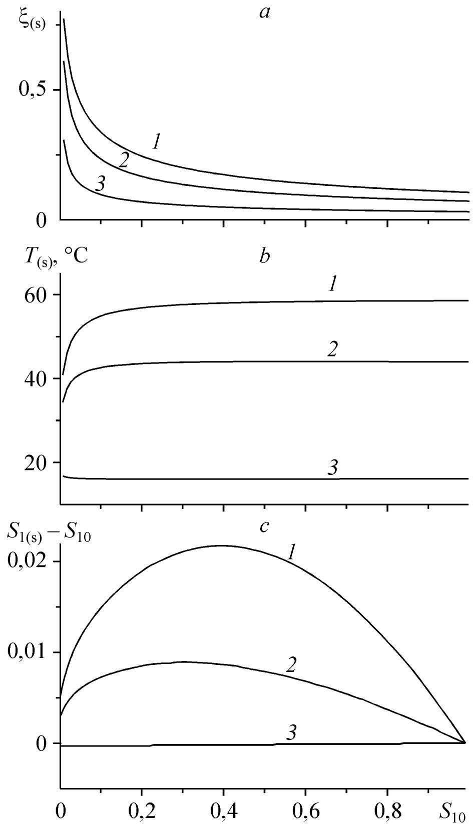

Рис. 5. Зависимости автомодельной координаты $\xi_{(s)}$ (*a*), температуры на границе влажной зоны $T_{(s)}$ (*b*) и разности объемных влагосодержаний $S_{l(s)} - S_{l0}$ (*c*) от исходного влагосодержания при сушке сухим воздухом. Линии *1*, *2* и *3* соответствуют T_e = 140, 80 и 20 °С.

существует, падает с ростом исходного влагосодержания. Это происходит потому, что температура на границе влажной зоны повышается с увеличением исходной температуры и раньше достигает своего предельного значения 100°С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена модель, описывающая процесс тепломассопереноса при сушке влажного пористого материала. Получены решения, описывающие распространение температурных и концентрационных полей. Установлено, что в зависимости от параметров внешнего воздействия может происходить как сушка, так и увлажнение среды. Показано, что в пористой среде, вблизи границы сухой и влажной зон может реализоваться температурная яма, а также увлажнение материала. Степень увлажнения прямо пропорциональна исходному влагосодержанию и температуре сушки, а температурная яма может реализоваться при сушке холодным воздухом. Кроме того, режим сушки с температурной ямой может реализоваться, когда исходное состояние парогазовой смеси близко к состоянию насыщения для любых температур внешнего воздействия T_e.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лыков А.В.** Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 471 с.
2. **Шубин Г.С.** Развитие методов расчета продолжительности высокотемпературной сушки плоских материалов и новые ее режимы для сушки древесины // IV Межд. форум по тепло- и массопереносу. — Минск, 2000. — Т. 9. — С. 30–40.
3. **Бабенко В.Е., Буевич Ю.А., Шепчук Н.М.** Квазистационарный режим сушки сферической частицы // Теоретические основы хим. технологий. — 1975. — № 2. — С. 247–277.
4. **Кумер И.Дж., Гупта Л.Н.** Приближенное решение обобщенной задачи Стефана для пористой среды с переменными теплофизическими свойствами // Тепломассообмен-V: Материалы V Всесоюз. конф. по тепломассообмену. — Минск, 1976. — Т. 5. — С. 187–197.
5. **Акулич П.В., Гринчик Н.Н.** Моделирование тепломассопереноса в капиллярно-пористых материалах // Инженерно-физический журнал. — 1998. — Т. 71, № 2. — С. 225–232.
6. **Разин М.М.** О подобии процессов тепло- и массообмена при сушке // Инженерно-физический журнал. — 2001. — Т. 74, № 3. — С. 29–33.
7. **Нигматулин Р.И.** Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. — Т. 1, 2.
8. **Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др.** Физические величины: Справочник / Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2007 г.