

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССАХ СУШКИ НЕНАСЫЩЕННЫХ КОЛЛОИДНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

О. Р. Дорняк

Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия
e-mail: olga@dorn.vrn.ru

Представлено теоретическое описание процессов тепло- и массообмена в анизотропных ненасыщенных коллоидных капиллярно-пористых материалах на основе механики гетерофазных систем. Учтены фазовые переходы, различная температура фаз, неодинаковые механизмы переноса свободной и адсорбционной воды, диффузионный перенос паровой компоненты в бинарной газовой смеси. Разработано описание гидродинамических процессов в коллоидном капиллярно-пористом теле с гидрофильными свойствами путем применения дополнительного усреднения по трем объемам - свободной воды и связанной воды (в смачивающих пленках и тонких прослойках).

Введение.

Прогресс в теории и практике сушки требует дальнейшего изучения фундаментальных закономерностей тепло- и массообмена, гидродинамики, технологии процесса на базе современных методов анализа, исследования методов физического и математического моделирования [1]. Большинство природных материалов, используемых в строительстве и промышленном производстве и подвергаемых термовлажностной обработке, являются гетерогенными системами, имеют сложную неоднородную структуру. Часть из них по своим свойствам относится к коллоидным капиллярно-пористым телам. Для изучения движения газов и жидкостей, тепло- и массообмена в реальных пористых средах, имеющих нерегулярную структуру, нельзя использовать обычные уравнения переноса, применяемые в сплошных гомогенных средах [2]. Наблюдаемые закономерности тепло- и массообмена в таких телах представляются результатом достаточно сложных явлений, происходящих на микро- и макроуровнях. При изучении процессов сушки капиллярно-пористых материалов с коллоидными свойствами возникают принципиальные трудности, обусловленные существенной ролью поверхностно-капиллярных сил и геометрией пористого тела. На учет этих особенностей направлены современные подходы к моделированию процессов тепло- и массообмена [3-4]. Математические модели, полученные методом усреднения по элементарному объему среды (квазигомогенное приближение), не позволяют анализировать роль ряда физических явлений, возникающих в материале при сушке. В частности такие модели не дают последовательного описания фазовых переходов, особенностей переноса свободной и связанной воды, а также диффузионного переноса компонент в парогазовой фазе.

Данная работа представляет математическую модель развития процессов переноса массы, импульса и энергии всех фаз коллоидного капиллярно-пористого материала с учетом широкого спектра физических и структурных факторов.

Макроскопическое описание теплофизических процессов выполнено в рамках механики многофазных систем [5]. Континуальные уравнения для макроскопических параметров жидкой, твердой и газообразной фаз системы получены методом объемного усреднения соответствующих микроуравнений для каждой из фаз в отдельности.

Постановка задачи.

Рассмотрим образец коллоидного капиллярно-пористого материала в форме бруска прямоугольного сечения. Материал будем считать трансверсально-изотропным. Волокна параллельны одной из сторон бруска – оси x_3 (рис. 1). Увлажненный образец помещен в паровоздушную среду, с заданными значениями температуры, давления и влагосодержания. Начальная влажность по сечению образца распределена в общем случае неравномерно. Среднее значение начальной влажности может быть как выше, так и ниже предела гигроскопичности материала. Перенос пара осуществляется преимущественно вдоль волокон и $v_1^1 \ll v_1^3, v_1^2 \ll v_1^3$. При этом $v_1^3 = v_1^3(x_1, x_2, x_3)$. Жидкая фаза несжимаема, ее плотность постоянна. Уравнения, записанные ниже, содержат значения

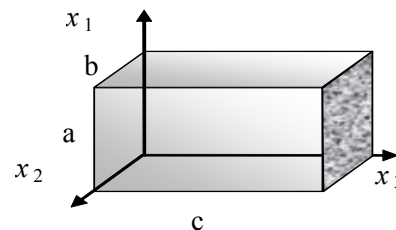


Рис. 1. Расчетная схема

переменных, усредненных по объемам фаз, при этом знак усреднения опущен. Т.е., например, под переменной f_2 следует подразумевать $\langle f_2 \rangle_2$.

Процессы переноса в парогазовой фазе.

Газовая фаза состоит из двух компонент – неконденсирующегося газа и водяного пара. Плотность парогазовой смеси и концентрация компонент определяются следующим образом:

$$\rho_1^o = \rho_{1v}^o + \rho_{1g}^o; \chi = \frac{\rho_{1v}^o}{\rho_1^o}; 1 - \chi = \frac{\rho_{1g}^o}{\rho_1^o}. \quad (1)$$

Паровая и газовая составляющие считаются идеальными газами. Для парциального давления и удельной внутренней энергии u имеем:

$$p_{1g} = \rho_{1g}^o T_1 B_{1g}; u_{1g} = c_{v1g} T_1; p_{1v} = \rho_{1v}^o T_1 B_{1v}; u_{1v} = c_{v1v} T_1. \quad (2)$$

Давление в парогазовой смеси определяется законом Дальтона для смеси идеальных газов:

$$p_1 = \rho_1^o T_1 B_1; B_1 = \chi B_{1v} + (1 - \chi) B_{1g}. \quad (3)$$

Значения скорости паровой и газовой компонент могут быть различны. Для их описания введены среднемассовая скорость смещений элементарных макрообъемов первой фазы v_1 и диффузионные скорости пара и газа:

$$v_1 = \chi v_{1v} + (1 - \chi) v_{1g}; w_{1g} = v_{1g} - v_1; w_{1v} = v_{1v} - v_1. \quad (4)$$

Относительное движение компонент определяется законом бинарной диффузии Фика:

$$w_{1g}^3 = \frac{\rho_1^o}{\rho_{1g}^o} D \frac{\partial \chi}{\partial x_3}; w_{1v}^3 = -\frac{\rho_1^o}{\rho_{1v}^o} D \frac{\partial \chi}{\partial x_3}. \quad (5)$$

Уравнения сохранения массы для парогазовой смеси и неконденсирующегося газа имеют вид:

$$\frac{\partial(\rho_1^o \alpha_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1^o \alpha_1 v_1^3)}{\partial x_3} = S_{12} j; \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1; \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho_1^o \alpha_1 (1 - \chi))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1^o \alpha_1 (1 - \chi) (v_1^3 + w_g^3))}{\partial x_3} = 0. \quad (7)$$

Случай $j > 0$ соответствует испарению, $j < 0$ – конденсации.

Уравнение движения и теплопроводности парогазовой фазы при сделанных предположениях можно записать следующим образом:

$$\rho_1^o \alpha_1 \left(\frac{\partial v_1^3}{\partial t} + v_1^3 \frac{\partial v_1^3}{\partial x_3} \right) = -\alpha_1 \frac{\partial p_1}{\partial x_3} - \frac{\alpha_1 \mu_1 v_1^3}{K_{13}^{33} \Psi_1(\theta_1)}; \quad (8)$$

$$c_{p1} \rho_1^o \alpha_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} + v_1^3 \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \right) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\alpha_1 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\alpha_1 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\alpha_1 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \right) + Q_{12} + Q_{13} +$$

$$\alpha_1 B_1 T_1 \left(\frac{\partial \rho_1^o}{\partial t} + v_1^3 \frac{\partial \rho_1^o}{\partial x_1} \right) + c_{v1} S_{12} j (T_1|_{\Sigma_{12}} - T_1); Q_{ji} = S_{ij} \alpha_{ji}^h (T_i|_{\Sigma_{ij}} - T_i); i, j = 1, 2, 3. \quad (9)$$

Процессы переноса в жидкой фазе.

Закономерности процессов сушки капиллярно-пористых тел зависят от объемного содержания и типа удерживаемой ими влаги. Механизм ее переноса, как известно, различен для свободной и связанной воды. Поэтому введено дополнительное усреднение микроуравнений для параметров жидкой фазы по объемам свободной и связанной воды. При этом рассматриваются два вида связанной воды – воды в смачивающих пленках (имеющих границу с парогазовой фазой), и в тонких слоях (между твердыми поверхностями), которые имеют существенно разное тепловое и механическое поведение. В модели используются параметры объемного содержания свободной воды $m_{св} = dV_{2св}/dV$, воды в тонких капиллярах $m_{т.сл} = dV_{2т.сл}/dV$ и воды в смачивающих пленках $m_{см} = dV_{2см}/dV$.

Вода в тонких слоях практически неподвижна вследствие малости здесь градиента давления жидкости по сравнению с силами сопротивления. Кроме того, вода этого типа не испытывает фазовых переходов, в отличие от воды свободной и в смачивающих пленках. Заметим, что роль тонких слоев велика в задачах расчета напряжений сушки.

Вода в искривленных смачивающих пленках движется в результате воздействия градиента давления, который обусловлен проявлениями капиллярных эффектов 1 и 2 рода [6].

Движение свободной воды отсутствует, если образец находится в поле внешних сил, создаю-

щих градиент давления.

Постановка гидродинамической задачи включает уравнения сохранения массы и изменения количества движения для каждого из видов воды, а также граничные и начальные условия. Уравнения изменения количества движения воды в смачивающих пленках записаны без учета конвективных членов, динамических эффектов фазовых переходов и массовых сил.

Усредненное давление в жидкой фазе представляется в виде

$$\langle p'_2 \rangle_2 = (m_{2cb} p_{2cb} + m_{2cm} p_{2cm} + m_{2т.сл} p_{2т.сл}) / \alpha_2. \quad (10)$$

При решении задач кинетики переноса воды, когда скорости течения пленок невелики, можно пользоваться уравнением Кельвина, справедливым в условиях локального равновесия на границе пленки воды и пара [3]. Полагая, что давление объемной жидкости равно давлению насыщенного пара над ее плоской поверхностью, имеем для давления в смачиваемых слоях:

$$p_{2cm} = p_{sat}^0 + P = p_{sat}^0 + \frac{RT}{\bar{v}} \ln \frac{p_{sat}}{p_{sat}^0}, \quad (11)$$

где \bar{v} – объем моля воды; p_{sat} , p_{sat}^0 – значения равновесного давления насыщенного пара над мениском и над плоской поверхностью воды. Если твердая фаза, проявляет гидрофильные свойства, то мениски воды являются вогнутыми, $p_{sat} < p_{sat}^0$, и $p_{2cm} < p_{sat}^0$. Формула Кельвина (11) позволяет с помощью уравнения изотермы сорбции $W = f(T, p_{lv} / p_{sat})$ вычислять давление в жидкости с учетом капиллярных эффектов 1 и 2 рода, избегая прямого расчета капиллярного и расклинивающего давления в тонких искривленных смачивающих пленках на поверхности твердой фазы [3].

Давление свободной воды в недеформируемой системе при изотермических условиях постоянно и равно давлению окружающей среды p_c . Перенос свободной воды отсутствует. При деформировании материала давление свободной воды в ненасыщенных областях по-прежнему будет оставаться равным p_c , а в зонах полного насыщения жидкой фазой давление свободной воды должно определяться в процессе решения сопряженной задачи из условия совместного деформирования твердого скелета и воды (равенства нормальных напряжений на границе жидкости и деформируемых стенок поровых каналов):

$$p_{2cb} = p_3, \quad p_3 = -\frac{1}{3} \langle \sigma'_3{}^{jj} \rangle_3. \quad (12)$$

При изучении процессов сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов (в условиях отсутствия внешнего механического воздействия), когда происходит изменение ее влажности в широком диапазоне значений, гидродинамическая постановка задачи осуществляется по-разному в трех основных выделенных интервалах изменения влажности W (табл. 1).

Таблица 1. Уравнения сохранения массы и движения жидкой фазы при сушке

Вода\Влажность	$W > W_{п.г}$	$W_a < W < W_{п.г}$	$0 < W < W_a$
Свободная	$\rho_2^o \frac{\partial m_{2cb}}{\partial t} = -jS_{12}$ $\vec{v}_{2cb} = 0$	$m_{2cb} = 0, \quad \vec{v}_{2cb} = 0$	
В смачивающих пленках	$m_{2cm} = 0;$ $\vec{v}_{2cm} = 0$	$\rho_2^o \left[\frac{\partial(m_{2cm})}{\partial t} + \nabla(m_{2cm} \vec{v}_{2cm}) \right] = -jS_{12} + q_{т.с}$	$q_{т.с} = -\rho_2^o \frac{\partial \alpha_2}{\partial t}$
		$q_{т.с} = 0$	
		$\rho_2^o m_{2cm} \frac{\partial \vec{v}_{2cm}}{\partial t} = -m_{2cm} \nabla p_{2cm}$ $-\frac{m_{2cm} \mu_2 (v_{2cm}^1 - v_3^1)}{K_{23}^1 \Psi_2(\theta_{2cm})} + \nabla(m_{2cm} \sigma_{2cm})$	
В тонких слоях	$\frac{\partial m_{2т.с}}{\partial t} = 0, \quad \vec{v}_{2т.с} = 0$		$\rho_2^o \frac{\partial m_{2т.с}}{\partial t} = -q_{т.с}$ $\vec{v}_{2т.с} = 0$

Первый интервал ограничен снизу пределом гигроскопичности $W_{п.г.}$ - значением максимальной влажности материала, достигаемым при сорбции. При влажности выше этого предела макропоры содержат свободную воду. В диапазоне значений влажности $[W_a, W_{п.г.}]$ вода содержится в тонких прослойках и в смачивающих пленках, ее удаление происходит из смачивающих пленок. В интервале влажности $[0, W_a]$ вода содержится преимущественно в тонких слоях. Предполагается, что обезвоживание материала в этом диапазоне влажности возможно за счет подпитывания смачивающих пленок водой тонких прослоек ($q_{т.с}$ - объемный расход жидкости в тонких прослойках).

Уравнение притока тепла жидкой фазы используется в форме:

$$c_2 \rho_2^o \alpha_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_1} (\alpha_2 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x_1}) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\alpha_2 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x_2}) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\alpha_2 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x_3}) - c_2 s_{12} j(T_2|_{\Sigma_{12}} - T_2) + Q_{12} + Q_{32} \quad (13)$$

Процессы переноса в твердой фазе.

Для твердой фазы уравнение теплопроводности представлено в виде:

$$c_3 \rho_3^o \alpha_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = Q_{13} + Q_{23} + \frac{\partial}{\partial x_1} (\alpha_3 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x_1}) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\alpha_3 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x_2}) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\alpha_3 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x_3}) \quad (14)$$

Полный тензор напряжений рассматриваемой гетерогенной системы σ^{kl} можно представить как сумму усредненных напряжений в фазах:

$$\sigma^{kl} = \alpha_1 \langle \sigma_1^{kl} \rangle_1 + \alpha_2 \langle \sigma_2^{kl} \rangle_2 + \alpha_3 \langle \sigma_3^{kl} \rangle_3; \alpha_i = \frac{dV_i}{dV}; \langle \sigma_i^{kl} \rangle_i = \frac{1}{dV} \int_{dV_i} \sigma_i^{kl} d'V,$$

где α_i , V_i - объемная концентрация и объем i -фазы, $i=1,2,3$ (1 – газообразная фаза, 2- жидкость, 3- твердая фаза); ' (штрих) относится к параметрам, являющимся средними в пределах микрообъема $d'V \ll a^3$, a – характерный размер пор.

Процесс деформирования образца при термообработке можно рассматривать как квазистатический. Из усредненного уравнения сохранения импульса, полагая, что деформации вдоль волокон пренебрежимо малы, что справедливо, в частности, для древесных материалов, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_3 \langle \sigma_3^{11} \rangle_3)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\alpha_3 \langle \sigma_3^{12} \rangle_3)}{\partial x_2} + p_3 \frac{\partial \alpha_3}{\partial x_1} + R_{13}^1 + R_{23}^1 &= 0; p_3 = -\frac{1}{3} \langle \sigma_3^{ij} \rangle_3; \\ \frac{\partial(\alpha_3 \langle \sigma_3^{12} \rangle_3)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\alpha_3 \langle \sigma_3^{22} \rangle_3)}{\partial x_2} + p_3 \frac{\partial \alpha_3}{\partial x_2} + R_{13}^2 + R_{23}^2 &= 0; j=1,2,3. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь $R_{13}^j, R_{23}^j (j=1,2)$ – проекции сил сопротивления фильтрационному переносу жидкой и газообразной фаз в пористом материале.

Полагая деформации линейными, принимая постоянной плотность твердой фазы, из уравнения сохранения массы твердой фазы, следуя работам Р.И. Нигматулина, имеем соотношение

$$\varepsilon_3^{kk} - \varepsilon_{30}^{kk} = -\frac{(\alpha_3 - \alpha_{30})}{\alpha_{30}}; \varepsilon_3^{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle h_3^i \rangle_3}{\partial x^i} + \frac{\partial \langle h_3^j \rangle_3}{\partial x^j} \right);$$

$$\langle h_3^i \rangle_3 = \langle h_3^i(x'_1, x'_2) \rangle_3; \langle h_3^3 \rangle_3 = 0. i, j=1,2. \quad (16)$$

Изменение объемной концентрация жидкой фазы в некотором микрообъеме за счет уменьшения объема образца может быть описано при сделанных выше предположениях как

$$\alpha_2 = \alpha_{20} [1 - (\varepsilon_3^{kk} - \varepsilon_{30}^{kk})]. \quad (17)$$

За начальное состояние принимается равновесное напряженно-деформированное состояние образца, установившееся при заданном давлении, температуре и влагосодержании окружающей паровоздушной среды.

Для описания напряженно-деформированного состояния материала при изменении его микроструктуры используется феноменологическая модель, сформулированная в [7]. Эта модель обобщает на случай ненасыщенной системы реологическое уравнение среды с двойной пористостью, полученное Ю.А.Бувевичем. Реологическое уравнение состояния учитывает, что структурный каркас и материал, из которого он сформирован, проявляют свойства наследственной термочувствительной среды. Особенность этого уравнения в том, что оно явным образом содержит значения объемного содержания воды (в том числе, воды в тонких микрокапиллярах, характерных для коллоидного тела), паровоздушной смеси и твердой фазы и учитывает неравновесные эффекты в граничных слоях.

Условия на межфазных и внешних поверхностях

Математическая модель включает уравнения сохранения на межфазных поверхностях. На границе раздела жидкость-пар (в поверхностной фазе Σ_{12}) учтена неравновесность фазовых переходов, кинетика которых описывается уравнением Герца-Кнудсена-Ленгмюра. Взаимосвязь между давлением и температурой вдоль линии насыщения определяется уравнением Клапейрона-Клаузиуса. Неравновесная схема фазовых переходов учитывает наличие скачка температур в граничном кнудсеновском слое пара.

Уравнение сохранения энергии в поверхностной Σ_{12} фазе без учета тепловой инерции Σ_{12} фазы и влияния искривленности межфазных поверхностей на ее температуру представлено в виде

$$S_{12}jL = \alpha_{1\Sigma_{12}}^h S_{12}(T_1 - T_1|_{\Sigma_{12}}) + \alpha_{2\Sigma_{12}}^h S_{12}(T_2 - T_2|_{\Sigma_{12}}). \quad (18)$$

Условия теплообмена на остальных поверхностях раздела фаз записаны в виде балансовых соотношений

$$S_{i3}\alpha_{3\Sigma_{i3}}^h (T_{\Sigma_{i3}} - T_3) = -S_{i3}\alpha_{1\Sigma_{i3}}^h (T_{\Sigma_{i3}} - T_i); \quad i=1,2. \quad (19)$$

Краевые условия на внешних границах бруска

для пара: $\alpha_1|_{\Gamma} = 1 - \alpha_2|_{\Gamma} - \alpha_3|_{\Gamma}$;

$$-\frac{\partial p_1}{\partial n}|_{\Gamma} = \beta_1^{\Gamma}(p_1|_{\Gamma} - p_c); -D\frac{\partial \chi}{\partial n}|_{\Gamma} = \gamma_1^{\Gamma}(\chi|_{\Gamma} - \chi_c); -\lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial n}|_{\Gamma} = \alpha_1^{\Gamma}(T_1|_{\Gamma} - T_c); \quad (20)$$

для жидкости (в смачивающих пленках):

$v_{2cm}^1|_{\Gamma} = 0$, $v_{2cm}^2|_{\Gamma} = 0$ - на непроницаемых границах;

$v_{2cm}^n|_{\Gamma} = -\frac{\partial p_{2cm}}{\partial n}|_{\Gamma} \frac{K_{23}^n \Psi_2(\theta_{2cm})}{\mu_2}$, $v_{2cm}^r|_{\Gamma} = 0$ - на проницаемых границах;

$$-\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial n}|_{\Gamma} = \alpha_2^{\Gamma}(T_2|_{\Gamma} - T_c); \quad \alpha_2|_{\Gamma} = 0.01W(T_c, \varphi_c)\alpha_3\rho_3^{\circ}/\rho_2^{\circ}; \quad (21)$$

$$\text{для твердой фазы: } -\lambda_3\frac{\partial T_3}{\partial n}|_{\Gamma} = \alpha_3^{\Gamma}(T_3|_{\Gamma} - T_c). \quad (22)$$

Граничные условия для задач деформирования материала при сушке в общем случае смешанные, их вид зависит от связей наложенных на образец.

Начальные условия имеют вид:

$$\alpha_1 = \alpha_{10}; \chi = \chi_0; v_2^1 = v_2^2 = v_1^3; \alpha_2 = \alpha_{20}(x_1, x_2, x_3); T_1 = T_2 = T_3 = T_0(x_1, x_2, x_3). \quad (23)$$

Вычислительный эксперимент применительно к сушке древесины.

Сформулированная задача, включающая уравнения (7-23) и гидродинамические уравнения, представленные в табл. 1, приведена к безразмерному виду. В число критериев подобия, характеризующих модель теплообмена в коллоидных капиллярно-пористых материалах входят Re_m , Da_{i3}^{nm} , Pe_i , Ku , Pe_{1D} , Nu_{1D}^{Γ} , Bi_3^h , Nu_{ij}^h , Nu_m^{Γ} , Bi_3^{Γ} , Kl_2 . Безразмерный комплекс Kl_2 отражает вклад капиллярного и расклинивающего давления в движение жидкой фазы в соответствии с формулой Кельвина. Сделан вывод о возможных предельных режимах движения парогазовой смеси, воды и теплообмена в отдельных фазах системы.

В данной работе с помощью вычислительного эксперимента исследуется нелинейная модель теплопереноса (без расчета напряженно-деформированного состояния материала). Аппроксимация дифференциальной задачи разностной проведена методом контрольного объема. При формировании дискретных аналогов уравнений переноса парогазовой смеси для аппроксимации конвективных членов использованы противопоточные разности, обеспечивающие устойчивость метода прогонки при решении систем разностных уравнений. Все уравнения линеаризованы с использованием метода Ньютона.

Для определения неизвестного поля давления парогазовой фазы используется известный алгоритм SIMPLE [8], разработанный для преодоления расходимости при расчете полей течений. В итерационном процессе использован метод нижней релаксации. Для решения линеаризованных уравнений неразрывности жидкой фазы применяется метод матричной прогонки. Для разностных уравнений теплопроводности всех фаз осуществлена процедура факторизации, т.е. температурные задачи

решаются методом переменных направлений.

Вычислительный алгоритм организован на основе одного внешнего и трех внутренних итерационных процессов (для уравнений переноса в газообразной, конденсированной и твердой фазах). Разработан вычислительный комплекс программ для ЭВМ. Для проверки его работы сформирована система тестовых задач, имеющих точное аналитическое решение. Расчеты на сгущающихся сетках косвенно также подтвердили сходимость алгоритма.

В процессе сушки происходит изменение площадей поверхностей контактного взаимодействия трех фаз изучаемой гетерогенной системы, в результате изменяется интенсивность тепло- и массообмена между фазами. Для определения удельных площадей поверхностей раздела фаз S_{12} (жидкость - парогазовая смесь), S_{23} (жидкость - твердая фаза), S_{13} (парогазовая смесь - твердая фаза) построена специальная расчетная схема.

Численно исследованы (применительно к древесине) закономерности развития трех- и двумерных полей термодинамических переменных газообразной, жидкой и твердой фаз в волокнистых материалах с коллоидными свойствами при различных режимах сушки в зависимости от начальных структурных характеристик материала (пористость, влажность) и свойств сушильного агента (температура, степень насыщенности, давление).

Апробация математической модели тепломассопереноса проведена путем сравнения результатов численных расчетов применительно к процессам высокотемпературной сушки древесины (без учета деформаций сушки), а также путем предельного перехода к модели диффузионно-фильтрационного влаготеплопереноса академика А.В. Лыкова. При реализации процедуры предельного перехода удалось одновременно получить аналитические выражения для представляющих трудность в определении коэффициентов диффузии влаги и критерия фазовых переходов. Эти соотношения могут быть использованы для технологических расчетов сушки рассматриваемых материалов.

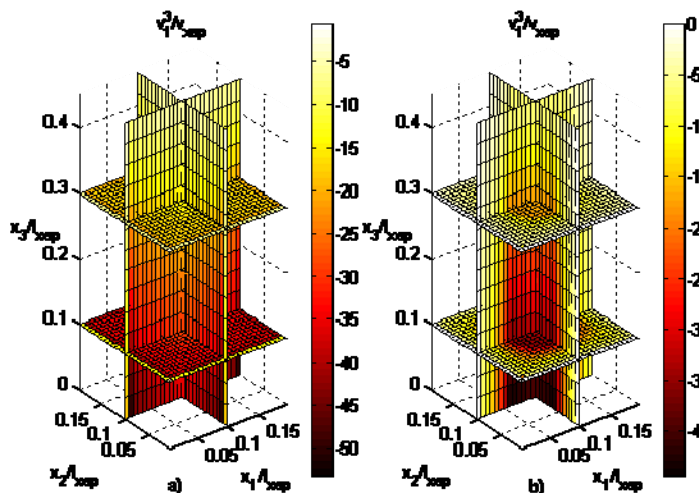


Рис. 2. Поле скоростей парогазовой фазы $v_1^3(x_1, x_2, x_3)$ при сушке древесины березы в моменты времени $t/t_{\text{хар}}=0,1$ - а), 4 - б) при $T_c=120^\circ\text{C}$, $T_m=84^\circ\text{C}$, $l_{\text{хар}}=c$, $n_t=0,74$ ($t_{\text{хар}}\approx 15$ мин)

меньшей влажностью (в приграничных областях поперечных сечений) скорость переноса газообразной фазы существенно ниже, чем в более увлажненных центральных зонах. В областях, прилегающих к боковым поверхностям заготовки, где сушка идет более интенсивно, падает сопротивление фильтрационному переносу, оставаясь достаточно высоким в зоне с высокой насыщенностью влагой.

На заключительном этапе сушки наблюдается общее снижение величины давления p_1 , выравнивание его величины в высушенных областях поперечного сечения образца. Избыточное давление имеет максимум там, где объемное содержание парогазовой смеси наименьшее, а жидкой фазы наибольшее (рис. 3). Интенсивность фазовых переходов на начальном этапе сушки неодинакова в различных точках поперечного сечения (рис. 3,с). В центре образца производство пара менее эффективно, что связано с несколько меньшим давлением насыщенного пара в этой зоне, поскольку переходный температурный процесс в жидкой фазе при $t/t_{\text{хар}}=0,1$ еще не закончился и значения T_2 здесь ниже, чем у границ. На конечном этапе сушки, когда влажность в центре образца меньше $W_{\text{пр}}$, интенсивность парообразования практически выравнивается по сечению (рис. 3 с'). При удалении от границ поперечного сечения значения j несколько возрастают в связи с увеличением величины активности пара.

В докладе представлены особенности развития полей термодинамических характеристик парогазовой смеси при высокотемпературной сушке древесины березы. Начальная влажность образца задавалась следующим образом: $W_0(x_1, x_2)=34+32\sin(\pi x_1/a)\sin(\pi x_2/b)$. Размеры образца $25\times 25\times 125$ мм. Величина $t_{\text{хар}}=l_{\text{хар}}^2/(\lambda_1/(\rho_{10}c_{p1}))/n_t$. Термическое сопротивление газообразной фазы весьма мало, ее температура устанавливается более чем на порядок быстрее, чем в остальных фазах. Поле скоростей парогазовой фазы перестраивается в процессе обезвоживания образца (рис. 2). На начальной стадии в сечениях, перпендикулярных волокнам, распределение скорости практически однородно. На завершающем этапе сушки, в области с

При интенсификации процессов сушки с ростом психрометрической разности сушильного агента поля переменных, относящихся к парогазовой смеси, качественно изменяются несущественно. Количественное же расхождение может быть велико, например, расчетные значения максимального избыточного давления в центре образца при $T_c=206^\circ\text{C} \sim 2$ раза выше, чем для процесса с $T_c=120^\circ\text{C}$ (при одинаковом значении t_M). Соответственно процесс сушки в первом случае заканчивается существенно раньше.

Газообразная фаза является смесью газов. Интенсивность фазовых переходов вода-пар зависит от концентрации паровой компоненты, которая неодинаково распределена по объему материала, а также изменяется со временем в процессе сушки. Вклад диффузионного переноса в парогазовой среде в процесс сушки коллоидных капиллярно-пористых тел, а также влияние на него внутренних и внешних условий массообмена определяются диффузионными критериями Нуссельта Nu_{1D}^{Γ} и Пекле Pe_{1D} .

Концентрация пара χ снижается интенсивнее при больших числах диффузионного числа Нуссельта, что приводит к большей скорости обезвоживания материала, обусловленной увеличением производства пара вследствие роста разности давления насыщения и парциального давления паровой компоненты.

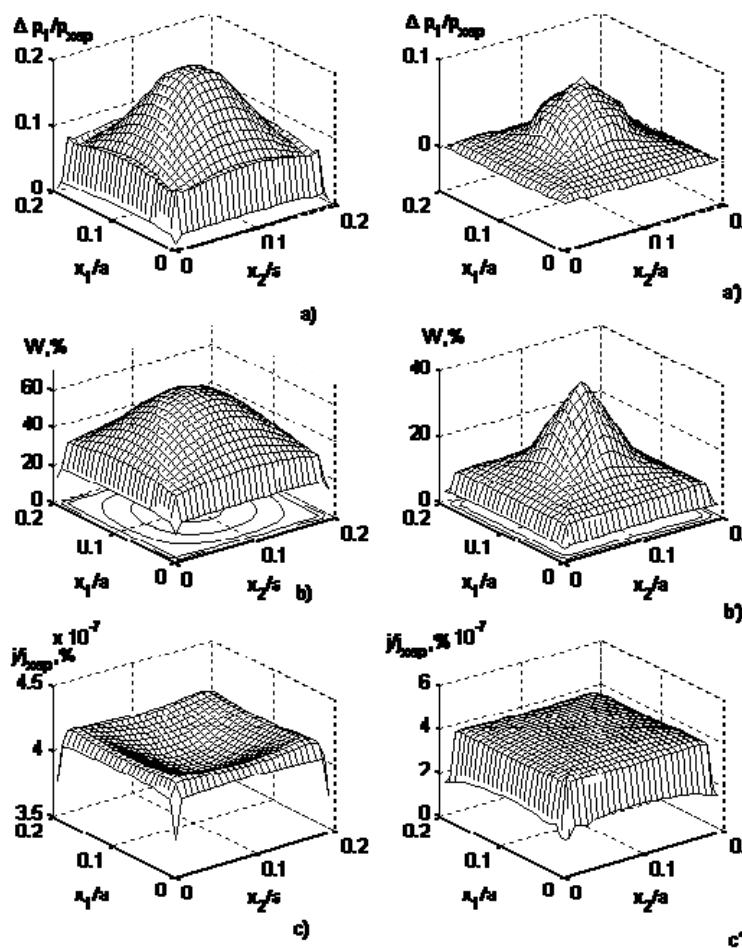


Рис. 3. Распределение в центральном поперечном сечении образца ($x_3/l_{xap}=0.5$) избыточного давления в газообразной фазе $\Delta p=p_1-p_c$ – а-а'), влажности b-b') и интенсивности парообразования j с-с') при сушке в моменты времени $t/t_{xap}=0.1$ – а-с), 4 – а'-с'). Значение $T_c=120^\circ\text{C}$, $T_M=84^\circ\text{C}$. $j_{xap}=\rho_2 l_{xap}/t_{xap}$

При значении $Nu_{1D} \ll 1$ процесс сушки существенно замедляется после удаления воды с внешних граней образца и установления там равновесной влажности при данной температуре окружающей среды. Его ускорение возможно за счет более интенсивных капиллярных перетоков связанной воды. При $Nu_{1D} \sim 1$ и $Nu_{1D} \gg 1$ процессы внешнего массообмена вносят наиболее существенный вклад в формирование полей основных теплофизических характеристик, определяя тем самым скорость процесса сушки образца.

Представляет интерес, что при сушке в гигроскопической области на фоне монотонного роста давления в газовой фазе интенсивность фазовых переходов изменяется со временем немонотонно при больших диффузионных числах Нуссельта. Падение величины j связано с уменьшением давления насыщенного пара вследствие снижения значения активности пара из-за потери влаги пористым материалом. Существенное уменьшение давления p_1 в середине расчетного периода обуславливает ту же тенденцию и для парциального давления пара, что приводит вновь к росту производства пара.

Поля концентрации пара в паровоздушной среде при сделанных допущениях близки к однородным в каждом поперечном сечении образца, а динамическое изменение профилей концентрации вдоль волокон определяется диффузионным числом Пекле. При больших числах Pe_{1D} практически не работает механизм внутреннего диффузионного переноса пара в парогазовой среде. Даже при достаточно благоприятных условиях внешнего массообмена ($Nu_{1D}=20$) процесс сушки идет значительно медленнее, чем при малых диффузионных числах Пекле. При $Pe_{1D} \gg 1$ в центре образца происходят процессы конденсации ($j < 0$). Средняя влажность материала снижается, как

показывают расчеты, в основном за счет испарения влаги в областях, близких к торцевым поверхностям.

При численном исследовании гидродинамических закономерностей сушки коллоидных волокнистых капиллярно-пористых материалов зависимость относительной фазовой проницаемости воды Ψ_2 от влагосодержания задавалась с помощью известной формулы С.Ф. Аверьянова. Определение коэффициента проницаемости для древесины и других нестабильных капиллярно-пористых материалов затруднительно, поэтому его величина варьировалась.

Таблица 2. Режимы вакуумной сушки древесины сосны.

Этап	$p_c, 10^5 \text{ Па}$	$T_c, ^\circ\text{C}$	φ_c	$\tau, \text{ час}$
I	1	60	0,5	1
II	0,6	60	0,32	10
III	1	70	0,52	1,5
IV	0,5	70	0,26	6
V	1	80	0,54	2,5
VI	0,4	80	0,21	18

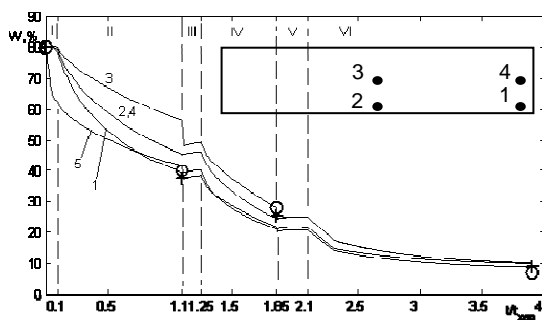


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные (по данным [9]) зависимости от времени влажности древесины сосны в различных точках сечения бруска $50 \times 180 \times 6000 \text{ мм}$ – 1-4 (номера кривых соответствуют точкам, показанным на схеме), средней по сечению влажности – 5. Маркер "o" использован для опытных значений температуры в центре образца, "+" – для значений средней влажности. Величина $t_{\text{хар}} = 10 \text{ час}$. Характеристики режимов I-VI указаны в табл. 2.

большого сечения из древесины трудно сохнущих пород позволяет получить материал высокого качества. Продолжительность сушки этого вида в 7-10 раз меньше, чем, например, конвективной. Для более эффективного обезвоживания условия пониженного давления комбинируют с различными способами нагрева.

При откачивании вакуумной камеры, в которую помещены влажные материалы, происходит изменение общего и парциальных давлений парогазовой смеси. Интенсивность удаления жидкой фазы из древесины вследствие фазовых переходов при пониженном давлении возрастает. Полный поток молекул с поверхности жидкости, равный разности потоков испарения и конденсации, увеличивается с уменьшением давления, поскольку поток испарения не зависит от давления, а поток конденсации прямо пропорционален давлению паров.

Математическое моделирование многоступенчатых режимов вакуумной сушки показало адекватность построенной модели тепломассопереноса опытным результатам [9] (рис. 4). Показано, что основной вклад в интенсификацию процесса сушки при пониженном давлении дает уменьшение относительной влажности сушильного агента при данной температуре - этапы (II, IV, VI).

Начальная стадия этапов, связанных со сменой сушильного агента и прогревом пиломатериалов при атмосферном давлении (III, V) характеризуется понижением влажности как на внешних границах, из-за установления более низкой равновесной влажности, так и во всем объеме, вследствие интенсивного парообразования при контакте пара с недогретой жидкой фазой. Затем влажность растет из-за процессов конденсации, причем более значительно в поверхностных областях, так что в поперечном сечении возможно формирование зон с градиентом влажности направленным к границам образца, что подтверждается опытными данными. Интересно, что распределение влажности такого

При сушке образцов с влажностью $W < W_{\text{п.г}}$ варьирование коэффициента проницаемости (числа Дарси) в диапазоне, характерном для древесины, незначительно влияет на динамику сушки. Это связано с тем, что выравнивание давления в паре приводит к выравниванию поля давления в жидкой фазе в соответствие с формулой Кельвина и тем самым к малым абсолютным значениям скорости жидкости. При высушивании образцов с высокой влажностью $W > W_{\text{п.г}}$ проницаемость оказывает более существенное влияние на интенсивность потери влаги. Большая проницаемость способствует более быстрому расширению таких зон в поперечном сечении, где наиболее эффективен процесс парообразования (с более высокими значениями площади удельной поверхности S_{12} и меньшим сопротивлением фильтрационному оттоку пара).

В рассмотренных условиях сушки максимальный градиент давления в смачивающих пленках наблюдается в приграничной области, где наиболее существенно изменяются значения влажности ($W < W_{\text{п.г}}$) и в соответствии с этим значения скорости. Показано также, что учет ортотропной анизотропии проницаемости жидкой фазы в характерных для древесины режимах течения ($Kl_2 Da_{23}^{jj} Re_2 \sim 10^{-3} \div 10^{-1}$, $j=1,2$) достаточно слабо влияет на кинетику сушки.

В докладе представлены результаты математического моделирования вакуумной сушки древесины. Сушка в вакуумных камерах пиломатериалов

характера, сформировавшееся в начале VI этапа сохраняется до конца сушки. Такое поле влагосодержания соответствует результатам опытов. Этот эффект связан с выравниванием по сечению скорости обезвоживания в VI периоде, которое обусловлено формированием на заключительном этапе сушки практически однородного поля избыточного давления парогазовой смеси при низких значениях влажности материала.

Заключение. В вычислительном эксперименте по регулированию процесса сушки задаются параметры сушильного агента (температура, давление и относительная влажность), а также произвольные неоднородные начальные поля температуры и влажности в образце. Результат численного моделирования - детальное описание характера изменения со временем полей давления парогазовой смеси, концентрации пара, распределения влагосодержания, а также температуры отдельных фаз. Разработанная математическая модель тепломассопереноса позволяет проектировать эффективные режимы конвективной, контактной и вакуумной сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов, а также осуществлять прогноз структурных и прочностных характеристик образца в процессах термовлажностной обработки коллоидных капиллярно-пористых материалов.

Список обозначений

$\langle \dots \rangle_i$ – усреднение по объему фазы i ; $\langle \dots \rangle_{ij}$ – усреднение по поверхности раздела фаз i и j ; a, b, d – размеры бруска, m ; B – индивидуальная газовая постоянная, $Дж/(кгK)$; c – теплоемкость, $Дж/(кгK)$; D – коэффициент бинарной диффузии, m^2/c ; h – перемещение, m ; j – поток массы пара, обусловленный фазовыми переходами, отнесенный к единице времени и единице площади, $кг/(m^2c)$; K_{j3}^{mm} – коэффициент проницаемости j -ой фазы при полном насыщении пористой системы в направлении m , m ; L – удельная теплота фазовых переходов, $Дж/кг$; m – объемное содержание; n – нормаль; p – давление, $Па$; P – равновесная составляющая расклинивающего давления, $Па$; R – радиус, m ; T – температура, K ; t – время, c ; V – объем, m^3 ; v – скорость, m/c ; s_{ij} – удельная поверхность раздела фаз i и j , m^{-1} ; W – влажность, %; x_1, x_2, x_3 – декартовы координаты, m ; α – объемное содержание фазы; α_i^Γ – коэффициент теплоотдачи i -ой фазы к окружающей среде через стенки пресс-формы, $Вт/(m^2K)$; α_{ij}^h – коэффициент теплоотдачи между фазами i и j , $Вт/(m^2K)$; $\beta_i^\Gamma, m^{-1}, \gamma_i^\Gamma, m/c$, — коэффициенты массообмена i -ой фазы с окружающей средой; σ^{kl} – тензор напряжений, $Па$; δ^{kl} – единичный тензор; ϵ^{kl} – тензор деформаций; λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/(mK)$; θ – насыщенность; ρ – плотность, $кг/m^3$; Ψ – относительная фазовая проницаемость. *Нижние индексы* относятся: 1,2,3 – к газообразной, жидкой и твердой фазам; g – к газовой компоненте; v – к пару; sat – состояние насыщения; Γ означает принадлежность к внешним границам древесного образца; 0 – к начальным значениям; $хар$ – к характерному значению параметра; $св$ – к параметру, усредненному по объему свободной воды; $см$ – к параметру, усредненному по объему воды в смачивающих пленках; $т.сл$ – к параметру, усредненному по объему воды в тонких слоях; $атм$ – атмосферное; $п.г.$ – предел гигроскопичности; c – к окружающей среде; Σ_{ij} – к границам раздела фаз i и j . *Верхние индексы*: i, j, k, l – обозначения компонент тензоров; (штрих) относятся к параметрам, являющимся средними в пределах микрообъема $d'V \ll a^3$ (a – характерный размер пор, m); $^\circ$ – истинное значение физической величины. *Безразмерные комплексы*:

$$Re_m = \frac{V_{хар} l_{хар} \rho_{хар}}{\mu_m}; \quad Da_{i3}^{mm} = \frac{K_{i3}^{mm}}{l_{хар}^2}; \quad Kl_2 = \frac{RT_{хар}}{V_2 p_{хар}}; \quad Re_i = \frac{l_{хар}^2}{t_{хар} \tilde{\alpha}_i}, \quad \text{где } \tilde{\alpha}_i = \frac{\lambda_i}{c_{pi} \rho_{хар}}; \quad Ku = \frac{L}{c_2 T_{хар}};$$

$$Pe_{1D} = \frac{l_{хар}^2}{t_{хар} D}; \quad Bi_3^\Gamma = \frac{\alpha_3^\Gamma l_{хар}}{\lambda_3}; \quad Nu_{ij}^h = \frac{\alpha_{ij}^h l_{хар}}{\lambda_i}; \quad Nu_{1D}^\Gamma = \frac{\gamma_i^\Gamma l_{хар}}{D}; \quad Bi_{3j}^h = \frac{\alpha_{3j}^h l_{хар}}{\lambda_3}; \quad Nu_m^\Gamma = \frac{\alpha_m^\Gamma l_{хар}}{\lambda_m}.$$

Литература

- [1] Рудобашта С. П. Фундаментальные исследования тепломассообмена при сушке. Труды 2 международ. науч. практич. конф. "Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и тепловые процессы СЭТТ-2005)". 2005. Т. 1. с.7-17. Изд-во ВИМ, Москва.
- [2] Павлюкевич Н. В. (2003) Введение в теорию тепло–и массопереноса в пористых средах.: Ин–т тепло– и массообмена им. А.В.Лыкова НАНБ, Минск.
- [3] Гринчик Н.Н., Акулич П.В., Куц П.С., Павлюкевич Н.В., Терехов В.И. К проблеме неизотермического массопереноса в пористых средах. Инженерно–физический журн. 2003. Т. 76, № 6. с. 129–141.
- [4] Современные подходы к исследованию и описанию процессов сушки пористых тел (2001) / Под

ред. В. Н. Пармона. Изд-во СО РАН, Новосибирск.

[5] Нигматулин Р. И. (1978) Основы механики гетерогенных сред. Наука, Москва.

[6] Исаченко В. П. (1977) Теплообмен при конденсации. Энергия, Москва.

[7] Дорняк О. Р. Математическое моделирование процесса уплотнения древесины. Инженерно-физический журн. 2005. Т. 78, № 5. с. 62–69.

[8] Патанкар С. (1984) Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. Энергоатомиздат, Москва.

[9] Чернышев А. Н. Экспериментальное определение показателей деформативности и прочности древесины в условиях вакуума. Деревообрабатывающая промышленность. 2006. № 2. с. 9-12.