

УДК 533.244

Математическое моделирование динамики процессов тепловлажностной обработки капиллярно-пористых коллоидных дискретных материалов

**Александр А. Федяев^а, Валентина Н. Федяева^а,
Юрий В.Видин^{б*}**

^а *Братский государственный университет,
665709 Россия, Братск, ул. Макаренко 40*

^б *Сибирский федеральный университет,
660041 Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79¹*

Received 1.02.2008, received in revised form 12.05.2008, accepted 30.05.2008

Разработано программное обеспечение математической модели поверхностного испарения, которое позволяет рассчитывать непрерывно весь процесс сушки как в жестких, так и мягких условиях. Для математической модели предложены универсальные граничные условия, в которых учитывается снижение действительной движущей силы внешнего массопереноса за счет уменьшения поверхностного влагосодержания. Выполнено тестирование программы на базе как проведенных экспериментальных исследований по влиянию переменной пористости капиллярно-пористых материалов и различных физических свойств испаряемых жидкостей, так и экспериментальных данных других авторов.

Ключевые слова: моделирование, капиллярно-пористый материал, тепловлажностная обработка, сушка.

Одобрена Правительством РФ “Энергетическая стратегия России до 2020 г.” и принятая им 17 ноября 2001 г. Федеральная целевая программа “Энергоэффективная экономика” предусматривают в числе важных приоритетов резкое повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на основе энергосберегающих технологий и оборудования и его совершенствования.

Среди приемов энергосбережения при тепловой сушке малоизученным аспектом является энергосбережение за счет снижения технологического брака. Рассматривая эту проблему на примере таких дискретных материалов лесной промышленности, как пиломатериалы, или промышленности строительных материалов, как кирпичи, можно предполагать, что снижение технологического брака, достигающего в этих отраслях промышленности величин 5 – 30 %, за счет рационального управления кинетикой сушки дискретного материала в различных точках поперечного сечения сушильных камер позволит снизить не только прямые затраты энергии на сушку, но и вспомогательные – на транспорт, рубку, распиловку исходного сырья. Выполнен-

* Corresponding author E-mail address: boiko@krgtu.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

ный нами анализ позволяет в масштабах страны оценить возможную экономию энергии только при сушке пиломатериалов в 1,5 – 1,8 млн тонн условного топлива.

Для разработки методов инженерного расчета и создания современных энергоэффективных сушильных установок необходима информация о процессах, развивающихся в их элементах, что невозможно без проведения широкомасштабных исследований. Нередко такая информация по своему объему недостаточна и требуется принятие конкретных технических решений в условиях неопределенности. Тогда наряду с проведением комплексных экспериментальных исследований гидродинамического совершенства существующих рабочих камер и технологических процессов как в промышленных, так и лабораторных условиях [1,2], также особенно эффективно применение методов математического моделирования сушильных и смежных процессов с помощью вычислительной техники.

В исследовании нестационарных полей влагосодержания и температуры в работе использовалась известная математическая модель, базирующаяся на системе нелинейных дифференциальных уравнений для нестационарного внутреннего влаго- и теплопереноса при сушке влажных тел:

$$C\rho_o \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \varepsilon \cdot r \cdot \rho_o \frac{\partial \omega}{\partial \tau} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial \omega}{\partial x} + a_m \delta \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где a_m , λ , δ – соответственно коэффициенты теплопроводности, теплопроводности и термоградиентный коэффициент; C , r , ε – удельная теплоемкость, теплота фазового перехода и критерий фазового превращения [3].

Универсальные граничные условия, предложенные в математической модели поверхностного испарения [4,5,6], учитывают снижение действительной движущей силы внешнего массопереноса за счет изменения поверхностного влагосодержания и интенсивность испарения. Модель поверхностного испарения описывает непрерывно в первом и втором периодах сушки весь процесс как в жестких, так и мягких условиях сушки.

Использование подобной модели в вычислительном эксперименте предполагается перспективным, поскольку в условиях непрерывного изменения входных условий в сушилке (различные виды пород, изменение структуры, начального влагосодержания и т.д.) только расчет на ЭВМ позволяет контролировать состояние материала на выходе из сушильной камеры и управлять процессом сушки по заданным в первую очередь критериям качества сушильного материала.

При конвективной сушке капиллярно-пористого тела в форме пластины граничные условия можно записать в виде

$$\pm \lambda \frac{\partial t}{\partial x} - \alpha(t_w - t_\infty) + \beta_p \cdot D_n (P_w - P_\infty) \cdot r(1 - \varepsilon) = 0, \quad (3)$$

$$\pm a_m \rho_o \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} + \delta \frac{\partial t}{\partial x} \right) - \beta_p \cdot D_n (P_w - P_\infty) = 0. \quad (4)$$

Начальные условия:

$$t(x) = t_o = f(x); \quad \omega(x) = \omega_o = f(x), \quad (5)$$

где β_p, α, ρ_o – соответственно коэффициенты массообмена и теплоотдачи, начальная плотность; D_n – критерий поверхностного испарения, определяемый по отношению действительного перепада движущей силы внешнего массопереноса к максимально возможному.

Критерий D_n учитывает не только реальные свойства конкретного материала, но и факторы, влияющие на массоперенос, такие как характерный размер пор, пористость материала.

Критерий поверхностного испарения учитывает также реальные свойства конкретного материала:

$$D_n = \frac{R_f}{R_f + 1 + P_w/P}, \quad (6)$$

где P_w – парциальное давление пара у поверхности мениска; P – полное давление в сушильном агенте; R_f – критерий интенсивности испарения, представляющий собой отношение диффузионных сопротивлений пограничного слоя и устьев капилляров с учетом действительного проходного сечения для пара.

Критерий интенсивности испарения учитывает также факторы, влияющие на массоперенос, такие как характерный размер пор, пористость материала Π :

$$R_f = (\omega \cdot \Pi / \omega_m)^{2/3}, \quad (7)$$

где ω_m – влагосодержание намокания.

При разработке уточненной методики расчета неравномерного тепломассообмена дифференциальные уравнения тепло- и массопереноса рассматриваются для системы капиллярно-пористое тело – связанное вещество, которая в области положительных температур ($t > 0$ °C) может быть в виде жидкости, пара и инертного газа. Часть капилляров в этих условиях заполнена жидкостью, а остальная часть – парогазовой смесью, если не учитывать влияние отрицательных температур.

Для обычных условий давление влажного воздуха близко к барометрическому, и масса воздуха и пара в капиллярах по сравнению с массой жидкости ничтожно мала. Поэтому в области положительных температур с большой степенью точности удельное влагосодержание тела можно считать равным удельному влагосодержанию жидкости, и если отмечать парообразную влагу индексом 1, а жидкость – 2, то $\omega = \omega_2$.

Жидкость в пористом теле в общем случае может перемещаться путем избирательной диффузии через скелет тела (молекулярный перенос) в виде фильтрационного движения под действием силы тяжести или гидростатического давления (молекулярный или конвективный перенос), а также путем капиллярного впитывания.

Как термодинамические характеристики, так и коэффициенты влаго- и теплопереноса (a_m, λ, δ) зависят от влагосодержания и температуры, а также от вида материала. Поэтому использование в широких диапазонах изменение характеристик материала отмеченной выше системы уравнений затруднено отсутствием кинетических коэффициентов.

Коэффициенты a_m и δ , если направление векторов диффузионных потоков пара и жидкости одинаково, соответственно равны:

$$a_m = a_{m_1} + a_{m_2}; \quad \delta = \frac{a_{m_1} \delta_1 + a_{m_2} \delta_2}{a_{m_1} + a_{m_2}}. \quad (8)$$

Термоградиентный коэффициент δ определяется экспериментально как отношение градиента влагосодержания к градиенту температуры в отсутствие массопереноса, поэтому в гигроскопической области $\delta_1 = \delta_2$. Можно описать и перенос пара и жидкости в гигроскопической области через единый градиент потенциала массопереноса θ . Если пренебречь эффектом Соре (термодиффузия пара и растворенного вещества в жидкости), то можно написать:

$$\vec{j}_m = -\lambda_m \nabla \theta, \quad (9)$$

где λ_m – коэффициент пропорциональности между плотностью потока влаги \vec{j}_m и градиентом потенциала $\nabla \theta$ называется коэффициентом массопроводности по аналогии с коэффициентом теплопроводности λ , равным $\lambda = j_q / \nabla t$.

Коэффициент a_m является аналогом коэффициента температуропроводности a_p :

$$a_m = \frac{\lambda_m}{c_m \gamma}; \quad a_p = \frac{\lambda}{c_p \gamma}, \quad (10)$$

где γ – плотность скелета пористого тела.

Данная аналогия обусловила в работах [3,7] название коэффициента a_m как коэффициента потенциалопроводности массопереноса, поскольку коэффициент температуропроводности a_p можно назвать коэффициентом потенциалопроводности теплопереноса. При интенсивном нагреве влажного тела также возникает градиент общего давления за счет испарения жидкости при температуре ≥ 100 °С.

Для различных температурных режимов зависимость коэффициента потенциалопроводности a_m и термоградиентного коэффициента δ для такого коллоидного капиллярно-пористого тела, как, например, сосна, представлены на рис. 1.

Для повышения достоверности проектирования конвективных сушильных установок необходимы углубленные исследования по влиянию различных факторов на интенсивность внешнего теплообмена. Отрывочные и противоречивые опытные данные (В.В. Смагин, Р.Ш. Вайнберг, Б.Ф. Бояршинов, О.Л. Данилов) по влиянию поровой структуры сушеного материала и физических свойств испаряемой жидкости, а также существенные отличия в значениях коэффициентов теплоотдачи при испарении из капиллярно-пористых тел и при вдуве в пограничный слой инертного газа вызывают необходимость более детального изучения физики происходящих при этом процессов.

Опытные исследования выполнялись на специально разработанном стенде, в качестве испаряемых жидкостей использовались вода, этиловый спирт и ацетон как теплоносители, имею-

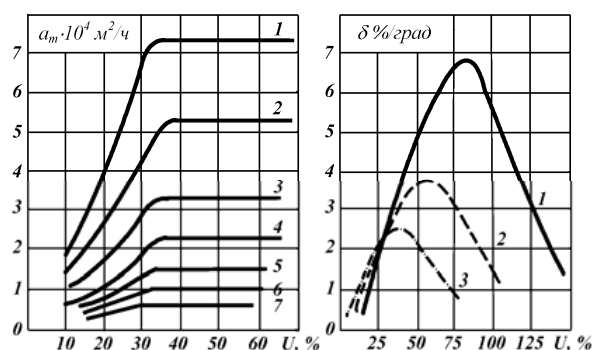


Рис.1. Зависимость коэффициента потенциалопроводности a_m (1 – 100 °С; 2 – 90 °С; 3 – 80 °С; 4 – 70 °С; 5 – 60 °С; 6 – 50 °С; 7 – 40 °С) и термоградиентного коэффициента δ (1 – 40 °С; 2 – 70 °С; 3 – 100 °С) от влагосодержания древесины (сосна)

щие различную, например, температуру кипения, теплоту фазового перехода и плотность. При измерении осредненных характеристик динамического и теплового пограничных слоев по длине пластины с различной пористой структурой (керамика, поролон) использовались миниатюрные хромель-копелевые термодатчики и щелевой насадок полного давления, а также термоанемометр. Температура основного потока при безградиентном течении в канале менялась в пределах $t = 20 \div 140$ °С, число $Re = 3,5 \cdot 10^5$, степень турбулентности $\varepsilon = 3,5$ %.

По результатам измерения осредненных характеристик определялось несколько параметров, в частности интенсивность испарения, $кг/м^2 \cdot ч$, по соотношению:

$$q_m = \frac{\alpha}{r} (t_n - t_{mm}), \quad (11)$$

где r – теплота фазового перехода, $кДж/кг$; t_n и t_{mm} – соответственно температура ядра нагретого потока и температура мокрого термометра.

Коэффициент теплоотдачи, $Вт/м^2 \cdot К$, определялся на основании измеренного температурного градиента:

$$\alpha = -\lambda \frac{(\partial t / \partial y)_w}{(t_n - t_{mm})}, \quad (12)$$

где λ – теплопроводность, $Вт/м \cdot К$; $(\partial t / \partial y)_w$ – градиент температуры у стенки, $К/м$.

При этом интенсивность теплообмена, $кДж/м^2 \cdot ч$, определяется как

$$q_w = q_m \cdot r. \quad (13)$$

Разброс опытных данных при проведении экспериментов составил до ± 8 %. Проведенные исследования подтвердили сделанные ранее предположения о влиянии на локальные коэффициенты отмеченных выше переменных параметров. Наиболее заметное влияние пористость материалов на коэффициент теплоотдачи и интенсивность испарения различных жидкостей оказывает при высоких температурах, что наглядно продемонстрировано на рис. 2а.

Величина теплового потока к поверхности при испарении воды и варьировании пористостью и температурным напором изменяется и по длине капиллярно-пористого материала. Величина коэффициента теплоотдачи (рис. 2б) снижается довольно значительно при уменьшении пористости, причем с ростом температурного напора эта разница увеличивается. Так, при уменьшении пористости до $\Pi = 0,8$ величина α снижается на 20 %, а при $\Pi = 0,17$ – более чем в два раза.

В исследуемом температурном диапазоне температура мокрого термометра у этилового спирта в среднем на $9 \div 11$ °С ниже, чем у воды, а у ацетона, соответственно, на $23 \div 25$ °С.

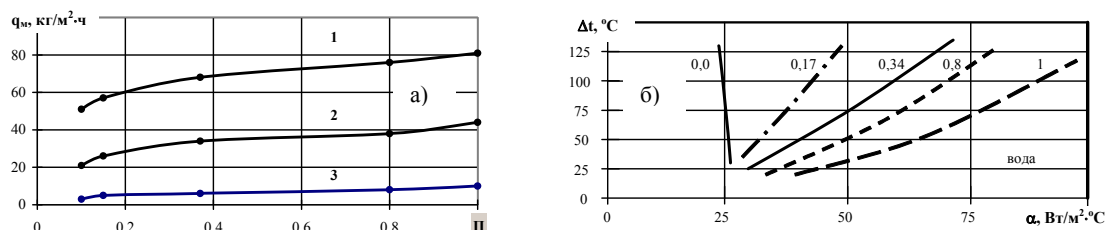


Рис. 2. а – влияние пористости материала на интенсивность испарения при температуре 100 °С различных жидкостей: 1 – ацетона; 2 – спирта; 3 – воды. б – Влияние пористости Π и температурного фактора Δt на коэффициент теплоотдачи α при испарении воды

Ориентировочно эти пропорции соблюдаются и при изменении коэффициентов теплоотдачи в зависимости от физических свойств исследуемых жидкостей. Опытные данные по интенсивности испарения и коэффициентам теплоотдачи могут служить тестом при оценке корректности математических моделей по отношению к реальному физическому процессу для отмеченных выше условий.

Алгоритм решения нелинейной краевой задачи влаго- и теплопереноса в капиллярно-пористых телах (уравнения 1-5) реализован программно на языке Pascal [8]. Для температурных режимов, пористости, коэффициентов влаго- и теплопереноса и термодинамических характеристик пористых материалов, использованных при экспериментальном исследовании процессов испарения, выполнено тестирование разработанной программы «Fields». Для обработки выходных данных (количество численных значений более 40000) разработана программа «Picture», позволяющая представлять интегральные и текущие числовые данные в виде графиков в размерных координатах.

Результаты расчета процесса сушки различных пород древесины (сосна – рис. 3, береза – рис. 4) удовлетворительно согласуются с опытными данными работы (Г.С. Шубин) и располагаются в диапазоне изменения влагосодержания материала вследствие изменения пористости (темный фон) в соответствующих временных интервалах продолжительности сушки.

Расчет процесса сушки сосны толщиной 25 мм выполнен при условиях: $\omega_n = 30\%$, $\omega_k = 5\%$, $t_c = 70\text{ }^\circ\text{C}$. При изменении пористости материала с 0,1 до 0,5 (рис. 3а) продолжительность процесса сушки уменьшается на 12-13%. Эволюция полей влагосодержаний и температур представлена на рис. 5.

Неучет влияния пористости (в диапазоне 0,1 и 0,5) приводит к увеличению продолжительности сушки березы на 18-19% (толщина 20 мм, $\omega_n = 100\%$, $\omega_k = 12\%$, $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$).

Для температурных режимов, пористости, коэффициентов влаго- и теплопереноса и термодинамических характеристик пористых материалов, использованных при экспериментальном исследовании процессов испарения, выполнено тестирование разработанной программы «Fields». Расчетные кривые по интенсивности испарения воды с пористой поверхности достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет сделать вывод о применимости

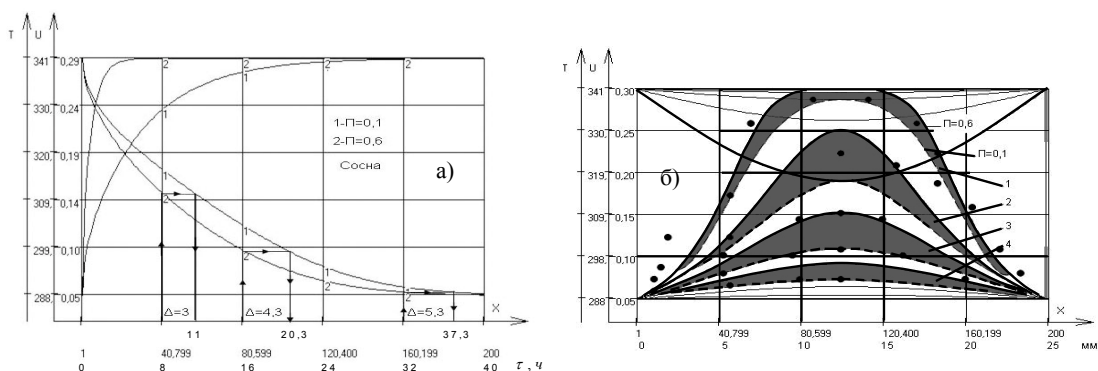


Рис. 3. Кривые сушки сосны толщиной 25 мм при изменении пористости (а) и совмещенные кривые распределения влаги в древесине (б) при пористости 0,1 и 0,5 при сушке сосны в интервалах по времени: 1-8; 2-16; 3-24; 4-32 часа. Точки – эксперимент (Г.С.Шубин)

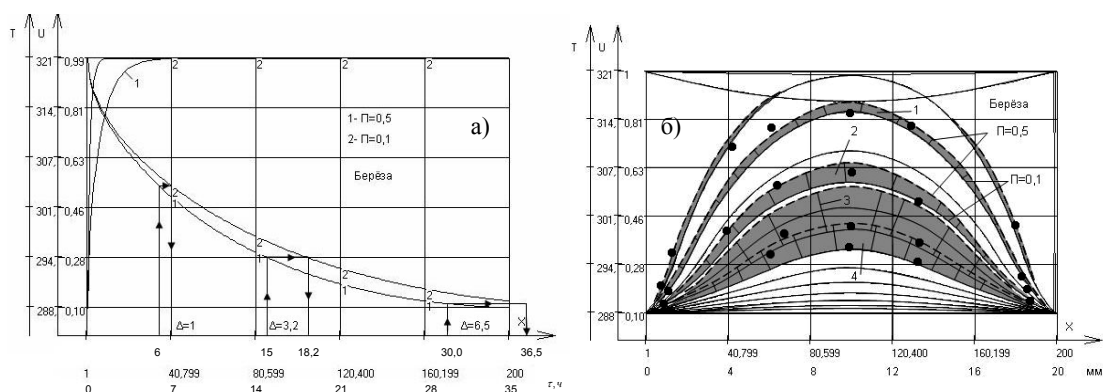


Рис. 4. Кривые сушки березы толщиной 20 мм при изменении пористости (а) и совмещенные кривые распределения влаги в древесине (б) при пористости 0,1 и 0,5 при сушке березы в интервалах по времени: 1-7; 2-15; 3-30; 4-37 часов. Точки – эксперимент (Г.С.Шубин)

данной методики расчета при различных граничных условиях к расчету интенсивности процессов испарения капиллярно-пористых структур.

Список литературы

1. Федяев А.А. Ресурсосбережение при конвективной сушке / А.А. Федяев, Ю.В. Видин // Вестник Международной академии наук высшей школы. Научный и общественный журнал. – Красноярск, 2000. – № 4 (14). – С. 209 – 215.
2. Федяев А.А. Повышение энергоэффективности сушильных камер непрерывного действия для пиломатериалов / А.А. Федяев, В.Н. Федяева // Лес и Бизнес. Журнал для лесопромышленников и деревообработчиков. – 2007. – № 4 (34). – С. 44-47.
3. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
4. Смагин В.В. Использование нестационарного энергоподвода для интенсификации процесса сушки плоских материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Смагин. – М., 1984. – 20 с.
5. Бояршинов Б.Ф. Конвективный теплообмен при испарении жидкости в газовый поток / Б.Ф. Бояршинов, Э.П. Волчков, В.И. Терехов // Известия СО АН СССР. – 1985. – Вып. 3. – № 16. – 17 с.
6. Данилов О.Л. Внутренний теплоперенос в капиллярно-пористом теле при нестационарных краевых условиях / О.Л. Данилов, В.В. Смагин // Теплообмен в капиллярно-пористых телах. – Минск, 1984. – Вып. 7. – Т.6. – С. 146-149.
7. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах испарения / А.В. Лыков // ИФЖ. – 1962. – Т.V. – № 11. – С. 12-24.
8. Федяев А.А. Программное обеспечение для численных исследований нестационарных полей движущих сил во влажных капиллярно-пористых материалах / А.А. Федяев // Вторая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005»: труды конференции.– М.: Изд-во ВИМ, 2005. – Т. 1. – С. 199-202.

The Mathematical Heat-Processing Dynamics Modeling of the Capillary-Porous Colloidal Discrete Materials

**Alexander A. Fedjaev^a, Valentina N. Fedjaeva^a
and Yury V. Vidin^b**

*^a Bratsk State University,
40 Makarenko st., Bratsk, 665709 Russia*

*^b Siberian Federal University,
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

The mathematical model software of the superficial evaporation, which allows to calculate the whole process of drying both in rigid and soft conditions of drying is developed in the paper. The universal boundary conditions for the mathematical model, that take account of the valid motive forces external mass transfer decrease, due to the superficial contents of water reduction are offered. The program testing is carried out on the basis of the experimental researches, analysing the influence of capillary-porous materials variable porosity and various physical properties of evaporated liquids, and the experimental data of other authors as well.

Key words: mathematical model, capillary-porous materials, external mass transfer, drying.
