



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.047.3:66.047.92

Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин

Сафин Руслан Рушанович родился в 1977 г., окончил в 1999 г. Казанский государственный технологический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры переработки древесных материалов КГТУ. Имеет более 70 печатных работ в области сушки капиллярно-пористых коллоидных тел.



Хасаншин Руслан Ромелевич родился в 1981 г., окончил в 2003 г. Казанский государственный технологический университет, аспирант кафедры переработки древесных материалов КГТУ. Имеет 10 научных работ в области деревообработки.



Сафин Рушан Гареевич родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Казанский химико-технологический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой переработки древесных материалов Казанского государственного технологического университета. Имеет более 200 печатных работ в области исследований тепло-массообменных процессов, разработки технологических процессов, протекающих при понижении давления, энергосберегающих, безотходных технологий и оборудования.



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В РАЗРЯЖЕННОЙ СРЕДЕ

Рассмотрен процесс конвективной сушки пиломатериалов в разряженной среде и предложена математическая модель.

Ключевые слова: сушка, древесина, вакуум, расчет.

Сушка древесины является одним из самых энергоемких процессов в деревообрабатывающей промышленности. Она значительно увеличивает себестоимость продукции вследствие высокой продолжительности процесса и больших тепловых потерь в окружающую среду. Применение вакуумных

технологий позволяет сократить продолжительность сушки и использовать пониженные температуры.

При реализации вакуумных способов возникают существенные трудности с подводом тепла в условиях понижения давления. Такие известные способы подвода тепла в вакууме, как ТВЧ- и СВЧ-энергия, являются дорогостоящими и не позволяют достичь равномерной влажности пиломатериалов по сечению штабеля. Контактные методы известны трудоемкостью и неудовлетворительным качеством вследствие развития по сечению пиломатериала трех различных зон влагосодержания. Наиболее перспективны в области вакуумной сушки древесины способы, использующие конвективный теплоподвод. Для широкого спектра пиломатериалов можно выделить метод конвективной сушки древесины при стационарном пониженном давлении. Его основное технологическое отличие состоит в том, что сушка происходит при постоянном подводе тепла конвекцией в разряженной среде. При этом можно использовать более низкие температуры, что приводит к существенному снижению энергетических затрат, уменьшает деструкцию древесины и не изменяет ее цвет.

Конвективная сушка пиломатериалов при стационарном пониженном давлении состоит из трех стадий. Первую стадию начинают подогревом пиломатериалов с помощью калориферов и вентилятора (рис. 1). Она происходит при атмосферном давлении.

Тепловой баланс процесса прогрева сушильного агента от калорифера можно представить в следующем виде:

$$K\Delta F_{\text{кал}} d\tau = \frac{c_{\mu_{\text{ср}}}}{\mu_{\text{ср}}} \rho_{\text{ср}} V_{\text{св}} dT_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где K – коэффициент теплопередачи, Дж/(м² · с · К);

Δ – движущая сила процесса теплопередачи, К;

$F_{\text{кал}}$ – площадь калорифера, м²;

τ – продолжительность прогрева;

$c_{\mu_{\text{ср}}}$ – молярная теплоемкость, Дж/(кмоль · К);

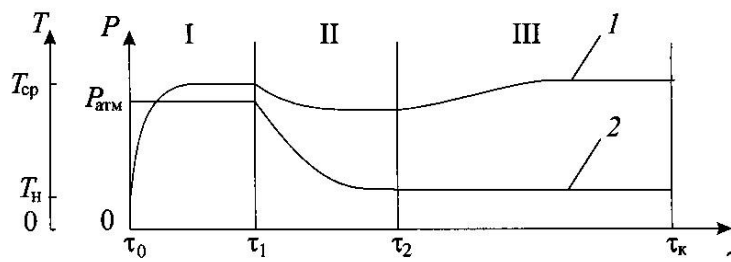


Рис. 1. Схема ведения конвективной сушки пиломатериалов при стационарном пониженном давлении в среде горячего воздуха: 1 – изменение температуры T ; 2 – давления P ; I – период прогрева, II – сушка при понижении давления, III – сушка в вакууме

$\mu_{\text{ср}}$ – молекулярная масса среды, кг/кмоль;
 $\rho_{\text{ср}}$ – плотность среды, кг/м³;
 $V_{\text{св}}$ – свободный объем аппарата, м³;
 $T_{\text{ср}}$ – температура среды в аппарате, К.

Левая часть уравнения (1) характеризует приток тепла от калорифера, правая – изменение внутренней энергии теплоносителя.

Из уравнения (1) получим

$$\frac{dT_{\text{ср}}}{d\tau} = \frac{K\Delta F_{\text{кал}}\mu_{\text{ср}}}{\rho_{\text{ср}}V_{\text{св}}c_{\mu_{\text{ср}}}}.$$

При прохождении вдоль высушиваемого материала теплоноситель охлаждается. Запишем в прямоугольных координатах дифференциальное уравнение теплопроводности в движущейся среде [3]:

$$\frac{\partial T_{\text{ср}}}{\partial \tau} + \omega_{\ell} \frac{\partial T_{\text{ср}}}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial T_{\text{ср}}}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial T_{\text{ср}}}{\partial z} = a_{\text{ср}} \Delta T_{\text{ср}} + \frac{Q_V}{c_{\text{ср}}\rho_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где ℓ – длина пиломатериала, м;

$a_{\text{ср}}$ – коэффициент температуропроводности среды, м²/с;

$c_{\text{ср}}$ – удельная теплоемкость среды, Дж/(кг · К);

Q_V – сток тепла от среды к пиломатериалу.

Пренебрегая молекулярной теплопроводностью, для одномерной задачи неустановившегося процесса из уравнения (2) получим:

$$c_{\text{ср}}\rho_{\text{ср}} \left(\frac{\partial T_{\text{ср}}}{\partial \tau} + \omega_{\ell} \frac{\partial T_{\text{ср}}}{\partial x} \right) = Q_V, \quad (3)$$

где $Q_V = \alpha \left(T_{\text{ср}} - T_{\text{мат}} \right) \frac{F_{\text{мат}}}{V_{\text{св}}}$;

α – коэффициент теплоотдачи, Дж/(м² · с · К);

$T_{\text{мат}}$ – температура материала пиломатериала, К;

$F_{\text{мат}}$ – площадь пиломатериала, м².

Подставляя (4) в (3), после некоторых преобразований имеем соотношение для определения изменения температуры агента сушки при его прохождении через штабель пиломатериалов:

$$\frac{\partial T_{\text{ср}}}{\partial \tau} = \frac{\alpha \left(T_{\text{ср}} - T_{\text{мат}} \right) F_{\text{мат}}}{c_{\text{ср}}\rho_{\text{ср}}V_{\text{св}}} - \omega_{\ell} \frac{\partial T_{\text{ср}}}{\partial \ell}.$$

Для описания тепломассопереноса внутри пиломатериала воспользуемся дифференциальными уравнениями А.В. Лыкова [4]. Применительно к одномерной симметричной пластине и при отсутствии фазовых превращений внутри материала для однокомпонентной жидкости его можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial U_{\text{мат}}}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 U_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right) + a_m \delta \left(\frac{\partial^2 T_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right); \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_{\text{мат}}}{\partial \tau} = a_{\tau} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right); \quad (7)$$

где $U_{\text{мат}}$ – влагосодержание материала, кг/кг;

a_m – коэффициент массопроводности, м²/с;

δ – относительный термоградиентный коэффициент, 1/К;

a_{τ} – коэффициент температуропроводности тела, м²/с.

Решение системы (5) – (7) находим при следующих краевых условиях:
начальные

$$U_{\text{нач}}(x=0) = U_0;$$

$$T_{\text{мат}}(x=0) = T_{\text{мат}0};$$

$$T_{\text{ср}}(\ell) = T_{\text{ср}0};$$

граничные

$$j_{\text{пов}} - \beta(\rho_{\text{рав}} - \rho_{\text{пов}}) = 0;$$

$$\alpha(T_{\text{ср}} - T_{\text{мат}}) = -\lambda \left. \frac{\partial T_{\text{мат}}}{\partial x} \right|_{x=0};$$

$$T_{\text{ср}}(\ell) = T_{\text{ср}}(\tau-1) + \Delta T_{\text{ср}}(\tau);$$

где $j_{\text{пов}}$ – поток массы с поверхности влажного материала, кг/(м² · с);

β – коэффициент массоотдачи, м/с;

$\rho_{\text{рав}}$ – равновесная плотность, кг/м³;

$\rho_{\text{пов}}$ – плотность паров на поверхности материала, кг/м³;

λ – коэффициент теплопроводности материала, Дж/(м · с · К);

$T_{\text{ср}}(\tau-1)$ – температура среды в предыдущий момент времени, К.

При достижении определенного значения температуры внутри пилломатериала начинается стадия вакуумирования ($\tau = \tau_1$). На стадии сушки при постоянно возрастающем вакууме и непрерывной циркуляции сушильного агента через материал происходит удаление свободной влаги под действием градиентов давления, влажности и температуры.

Если все пилломатериалы в штабеле находятся в одинаковых условиях, запишем уравнение материального баланса по пару для процесса понижения давления:

$$j_{\text{пов}} F_{\text{мат}} d\tau - Q_{\text{с.п}} \rho_{\text{п}} d\tau = V_{\text{св}} d\rho_{\text{п}}. \quad (8)$$

В уравнении (8) первый член левой части выражает приток пара в парогазовую смесь за счет его испарения с поверхности влажного материала; второй ($Q_{\text{с.п}}$) – отвод пара из аппарата в вакуумную линию; правая часть представляет изменение парциальной плотности пара в парогазовой смеси в аппарате.

Для газа аналогично запишем уравнение материального баланса, но при отсутствии притока газа в парогазовую смесь:

$$-Q_{\text{с.г}} \rho_{\text{г}} d\tau = V_{\text{св}} d\rho_{\text{г}}. \quad (9)$$

В уравнениях (8) и (9) фигурируют объемные производительности системы удаления пара $Q_{с.п}$ и системы удаления газа $Q_{с.г}$. Обычно при сушке с понижением давления сушильная камера подключается к вакуумному насосу через конденсатор, который работает как своеобразный насос по пару. Очевидно, что в этом случае объемная производительность системы удаления пара будет складываться из объемных производительностей вакуумного насоса и конденсатора:

$$Q_{с.п} = Q_{н} + Q_{к},$$

а объемная производительность системы удаления газа равна объемной производительности вакуумного насоса:

$$Q_{с.г} = Q_{н}.$$

Объемные производительности конденсатора $Q_{к}$ и вакуумного насоса $Q_{н}$ определяют из следующих выражений [1, 7]

$$Q_{к} = \frac{S_{к} K \Delta}{r \rho_{ср}};$$

$$Q_{н} = \frac{V_{св}}{\tau_1} \ln \frac{P_{атм}}{P_{ост}},$$

где $S_{к}$ – поверхность теплопередачи конденсатора, м²;

r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;

$P_{атм}$ – атмосферное давление, Па;

$P_{ост}$ – остаточное давление в аппарате, Па.

Плотность парогазовой смеси $\rho_{п(г)}$ связана с ее давлением $p_{п(г)}$ уравнением Менделеева–Клапейрона:

$$\rho_{п(г)} = \frac{p_{п(г)} \mu_{п(г)}}{RT_{ср}}, \quad (10)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль · К);

$\mu_{п(г)}$ – молекулярная масса парогазовой смеси, кг/кмоль.

Продифференцировав выражение (10), получим

$$d\rho_{п(г)} = \mu_{п(г)} \frac{T_{ср} dp_{п(г)} - p_{п(г)} dT_{ср}}{RT_{ср}^2}. \quad (11)$$

Площадь поверхности материала определим из выражения

$$F_{мат} = 2sb + \ell z^*, \quad (12)$$

где s, b, ℓ – толщина, ширина и длина образца, м;

z^* – количество образцов в аппарате, шт.

Подставив выражения (10) – (12) в уравнения (8) и (9), после некоторых преобразований получим дифференциальные уравнения изменения давления над пиломатериалами:

по пару

$$\frac{dp_{\text{п}}}{d\tau} = \frac{2\epsilon + b}{V_{\text{св}}\mu_{\text{п}}} j_{\text{пов}} - p_{\text{п}} \left(\frac{Q_{\text{сп}}}{V_{\text{св}}} - \frac{1}{T_{\text{ср}}} \frac{dT_{\text{ср}}}{d\tau} \right);$$

по газу

$$\frac{dp_{\text{г}}}{d\tau} = p_{\text{г}} \left(\frac{1}{T_{\text{ср}}} \frac{dT_{\text{ср}}}{d\tau} - \frac{Q_{\text{с.г}}}{V_{\text{св}}} \right).$$

Изменение температуры среды определим из теплового баланса паровой фазы:

$$\rho_{\text{ср}} c_{\text{ср}} V_{\text{св}} dT_{\text{ср}} = \alpha \epsilon_{\text{мат}} (T_{\text{ср}} - T_{\text{мат}}) \dot{F}_{\text{мат}} d\tau - Q_{\text{сп}} \rho_{\text{ср}} c_{\text{ср}} T_{\text{ср}} d\tau + c_{\text{ср}} F_{\text{мат}} j_{\text{пов}} T_{\text{ср}} d\tau + c_{\text{ср}} \rho_{\text{ср}} T_{\text{ср}} Q_{\text{кал}} d\tau, \quad (13)$$

где $Q_{\text{кал}}$ – объемная производительность калорифера.

Левая часть уравнения (13) характеризует изменение теплосодержания паровой фазы; первый член правой части – подвод или отвод тепла за счет теплообмена с поверхности влажного материала; второй – отвод тепла с удаляемыми в вакуумную линию парами; третий – приток тепла с парами влаги, удаляемыми из материала; четвертый – приток тепла из калорифера.

Полное давление среды определяем по закону Дальтона [2]:

$$P_{\text{ср}} = p_{\text{п}} + p_{\text{г}},$$

где $p_{\text{п}}$, $p_{\text{г}}$ – соответственно давление пара и газа в аппарате, Па.

Поделив (13) на $d\tau$ и подставив в него (10), после некоторых преобразований получим дифференциальное уравнение изменения температуры паровой среды:

$$\frac{dT_{\text{ср}}}{d\tau} = \left[\frac{\alpha F_{\text{мат}} R \epsilon_{\text{мат}} (T_{\text{ср}} - T_{\text{мат}})}{c_{\text{ср}} V_{\text{св}} \mu_{\text{п}} + p_{\text{г}} \mu_{\text{г}}} - \frac{Q_{\text{сп}}}{V_{\text{св}}} + \frac{F_{\text{мат}} R T_{\text{ср}} j_{\text{пов}}}{V_{\text{св}} \mu_{\text{п}} + p_{\text{г}} \mu_{\text{г}}} + \frac{Q_{\text{к}}}{V_{\text{св}}} \right] T_{\text{ср}}.$$

Для описания тепломассопереноса внутри материала воспользуемся дифференциальными уравнениями А.В. Лыкова [4]:

$$\frac{\partial U_{\text{мат}}}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 U_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right) + a_m \delta \left(\frac{\partial^2 T_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right) + \frac{k_p}{\rho_0} \left(\frac{\partial^2 P_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right); \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_{\text{мат}}}{\partial \tau} = a_m \frac{r\epsilon}{c} \left(\frac{\partial^2 U_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right) + \left(a_{\text{г}} + \frac{r\epsilon}{c} a_m \delta \right) \left(\frac{\partial^2 T_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right) + a_m \frac{r\epsilon}{c} \delta_p \left(\frac{\partial^2 P_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right); \quad (15)$$

$$\frac{\partial P_{\text{мат}}}{\partial \tau} = \left(a_p - a_m \frac{\epsilon}{c_p} \delta_p \right) \left(\frac{\partial^2 P_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right) - a_m \frac{\epsilon}{c_p} \left(\frac{\partial^2 U_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right) - a_m \frac{\epsilon}{c_p} \delta \left(\frac{\partial^2 T_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right), \quad (16)$$

где k_p – коэффициент фильтрационного переноса, с;

ρ_0 – плотность абсолютно сухого тела, кг/м³;

ϵ – критерий парообразования;

c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг · К);

δ_p – коэффициент фильтрационного потока влаги, $\text{м} \cdot \text{с}^2/\text{кг}$;
 a_p – коэффициент конвективной фильтрационной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;
 c_p – коэффициент емкости влажного воздуха в материале, $\text{м} \cdot \text{с}^2/\text{кг}$.

Начальные условия для влагопереноса в процессе понижения давления представляют собой поля температуры и влагосодержания после стадии прогрева.

Граничные условия для момента времени τ_1 , соответствующего началу стадии вакуумирования, запишем в виде следующих выражений [6]:

$$U_{\text{пов}} = a^* \left(\frac{P}{P_{\text{нас}}} \right)^n; \quad (17)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_{\text{мат}}}{\partial x} \Big|_{x=0} = j_{\text{пов}} r + T_{\text{мат}} j_{\text{пов}} c_{\text{п}} + \alpha (T_{\text{мат}} - T_{\text{ср}}); \quad (18)$$

$$P_{\text{мат}} \Big|_{x=0} = P_{\text{ср}}, \quad (19)$$

где a^* , n – коэффициенты в уравнении изотермы Фрейндлиха.

Поток влаги к поверхности массообмена определим из соотношения

$$j_{\text{пов}} = \rho_0 \left(a_m \frac{\partial U_{\text{мат}}}{\partial x} \Big|_{x=0} + a_m \delta \frac{\partial T_{\text{мат}}}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{k_p}{\rho_{\text{ср}}} \frac{\partial P_{\text{мат}}}{\partial x} \Big|_{x=0} \right).$$

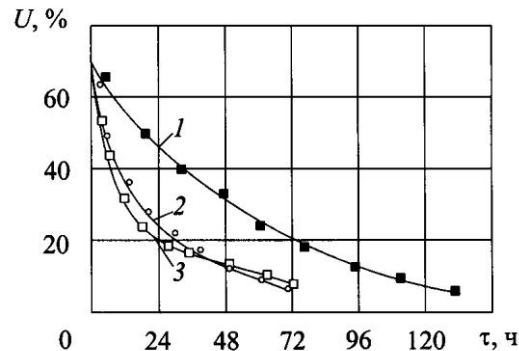
Далее следует стадия сушки пиломатериалов при фиксированном остаточном давлении в аппарате, где температура в камере повышается до определенного режимного значения. При вакуумной сушке тепломассоперенос внутри материала описывается системой уравнений (14) – (16) при краевых условиях (17) – (19).

Для проверки математической модели на адекватность была использована экспериментальная установка, позволяющая сушить древесину при стационарном пониженном давлении. Установка включала обогреваемую вакуумную камеру, внутри которой расположены калориферы, вентилятор и экраны, формирующие аэродинамический тракт циркуляции сушильного агента. Камера соединена через кожухо-трубчатый конденсатор с вакуумным насосом. В установке предусмотрены приборы регистрации и автоматизации режимных параметров процесса. На рис. 2 представлены результаты экспериментального исследования удаления влаги из соснового образца толщиной 50 мм при начальной влажности 85 %, температуре сушильного агента 348 К и скорости циркуляции 5 м/с. Полученные кривые характеризуют расчетные значения изменения влажности древесины во времени, точками обозначены опытные данные.

Из представленных на рис. 2 зависимостей видно, что продолжительность классической конвективной сушки древесины сосны в камере почти в 2 раза выше, чем при вакуумных режимах.

Проверкой на адекватность установлено, что максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 19 % [5].

Рис. 2. Кинетические кривые сушки древесины сосны при $T = 348 \text{ К}$: 1 – $P = 10^5 \text{ Па}$; 2 – $7 \cdot 10^4$; 3 – $5 \cdot 10^4 \text{ Па}$



Как видно из рис. 2, с уменьшением остаточного давления P и падением влагосодержания U ниже 25 % происходит снижение скорости сушки. Поэтому целесообразно к концу процесса сушки постепенно повышать давление среды.

Полученные результаты позволяют определить рациональные режимные параметры данного способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев, С.М. Теория тепломассообмена [Текст] / С.М. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов. – М.: Высш. шк., 1979. – 495 с.
2. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 784 с.
3. Луканин, В.Н. Теплотехника [Текст] / В.Н. Луканин, Г.М. Шатров, Г.М. Камфер. – М.: Высш. шк., 2002. – 671 с.
4. Лыков, А.В. Теория сушки [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
5. Спиридонов, В.П. Математическая обработка физико-химических данных [Текст] / В.П. Спиридонов, А.А. Лопаткин. – М.: МГУ, 1970. – 222 с.
6. Шубин, Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины [Текст] / Г.С. Шубин. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 336 с.
7. Шумский, К.П. Вакуумные аппараты и приборы химического машиностроения [Текст] / К.П. Шумский. – М.: Машиностроение, 1974. – 576 с.

Казанский государственный
технологический университет

Поступила 11.01.05

R.R. Safin, R.R. Khasanshin, R.G. Safin

Process Mathematical Model of Sawn-wood Convection Drying in Discharged Medium

The process of convection drying for sawn wood in the discharged medium is viewed and the mathematical model is proposed.