

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

УДК 674.047

ТЕРМОДИНАМИКА ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

В. М. ПОПОВ, В. П. БЕЛОКУРОВ

Воронежский лесотехнический институт

Сушка пиломатериалов — сложный процесс тепло- и массообмена. Для выбора оптимального режима сушки древесины необходима информация о характере влияния внешнего воздействия на процессы тепло- и массопереноса и о формировании полей градиентов влажности, температуры и внутреннего избыточного давления.

Ранее предполагали, что перемещение влаги в пиломатериалах осуществляется под действием градиента концентрации влаги и соответствующих коэффициентов диффузии. Экспериментальные исследования показали [2], что при сушке пиломатериалов важную роль (а может быть и первоочередную) играет фильтрационный влагоперенос, осуществляемый за счет градиента внутреннего избыточного давления. Г. С. Шубин [4] одним из первых исследовал внутреннее избыточное давление, которое возникало еще в период прогрева древесины, т. е. при температуре образца ниже температуры насыщения. Отсюда можно сделать вывод, что внутреннее избыточное давление есть давление парогазовой смеси, а не только одного водяного пара. Возникновение давления можно объяснить расширением находящегося внутри нагреваемой древесины воздуха и пара и сопротивлением скелета материала фильтрационному влагопереносу.

В связи с вышеизложенным определен интерес представляет аналитическая зависимость, позволяющая установить влияние различных градиентов на процесс сушки пиломатериалов. Для этого рассмотрим термодинамику паровоздушной смеси в процессе сушки древесины. Согласно первому закону термодинамики, тепло, подведенное к паровоздушной смеси, расходуется на изменение внутренней энергии и на совершаемые работы по расширению смеси:

$$dQ = dU + dL, \tag{1}$$

где $U = Wu = W(i - pv)$ — внутренняя энергия паровоздушной смеси массой W ;
 i — энтальпия паровоздушной смеси;
 v — удельный объем паровоздушной смеси при давлении p .

Известно, что $Wv = V$ — объем, занимаемый в капиллярах паровоздушной массой. Учитывая, что объем капилляров V — величина постоянная, имеем $dV = 0$. Масса же паровоздушной смеси W — величина переменная. Тогда

$$dU = Wdu + udW$$

или

$$dU = Wd(i - pv) + (i - pv)dW.$$

Отсюда

$$dU = idW + Wdi - Vdp. \tag{2}$$

Так как в процессе экспериментальных исследований измеряемыми параметрами являются внутреннее избыточное давление [3] и температура T , то i и di выразим через эти величины:

$$\begin{aligned} di &= \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T dp = c_p dT + \left(\frac{\partial(u + pv)}{\partial p}\right)_T dp = \\ &= c_p dT + \left[p\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T + v\right] dp. \end{aligned}$$

Так как согласно работе [1]

$$p\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = -T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p,$$

то

$$di = c_p dT - \left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right] dp. \tag{3}$$

Отсюда

$$i = i_0(T) + \int_0^p \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp. \quad (4)$$

Подставив выражения (3) и (4) в (2), получим:

$$du = W \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p dT + W \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp + \left\{ i_0(T) + \int_0^p \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp \right\} dW - V dp$$

или

$$du = idW + W \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p dT - W \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] dp - V dp. \quad (5)$$

Из выражения (1) найдем второе слагаемое, т. е. работу расширения паровоздушной смеси в капиллярах древесины:

$$dL = W dl = W p dv = - p v dW. \quad (6)$$

При определении dQ предположим, что прогрев капиллярно-пористого материала древесины площадью F за время $d\tau$ осуществляется исключительно за счет теплопроводности. Тогда на основании закона Фурье запишем

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dx} F d\tau. \quad (7)$$

Подставив (5), (6) и (7) в уравнение (1), найдем:

$$-\lambda \frac{dT}{dx} F d\tau = idW + W \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p dT + W \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp - V dp - p v dW$$

или

$$-\lambda \frac{dT}{dx} F d\tau = idW + W \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p dT - WT \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp - p v dW. \quad (8)$$

Разделим обе части уравнения (8) на $d\tau$

$$-\lambda \frac{dT}{dx} F = i \frac{dW}{d\tau} + W \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p \frac{dT}{d\tau} - WT \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \frac{dp}{d\tau} - p v \frac{dW}{d\tau}. \quad (9)$$

Для определения в выражении (9) слагаемых $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$, $\left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p$ и энтальпии i используем уравнение состояния для паровоздушной смеси. А так как в экспериментах измеряли парциальное давление p и температуру T , и:

$$p v = RTz(p, T), \quad (10)$$

где z — коэффициент сжимаемости, определяемый по графикам или из соответствующих таблиц; он дает возможность оценить степень графического отклонения данной паровоздушной смеси от ее поведения в идеальном состоянии.

Из уравнения (10) легко определить $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$. Энтальпию находим из равенства

$$i(p, T_2) = i(p, T_1) + \int_0^p \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp,$$

а затем вычисляем и $\left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p$.

В выражении (9) неизвестной остается лишь одна величина W , характеризующая массу паровоздушной среды в порах древесины; последнюю определяем из уравнения (10):

$$W = \frac{pV}{RTz}.$$

С помощью уравнения (9) представляется возможность проследить влияние на процесс сушки пиломатериалов таких факторов, как градиенты влажности, темпера-

туры и избыточного парциального давления паровоздушной смеси. Количественная характеристика различных полей потенциалов, влияющих на сушку пиломатериалов, позволит оценить и качественную сторону процесса, определяющую перенос тепла и массы в изучаемой системе, и наметить пути оптимального режима сушки при интенсификации данного технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика.— М.: Энергия, 1974.— 448 с. [2]. Лебедев П. Д. Высокотемпературная сушка материалов под действием внутреннего градиента давления пара: Тр. МЭИ, 1958.— Вып. 30. [3]. Лыков А. В., Максимов Г. А. Исследование процесса сушки в поле высокой частоты. Тепло- и массообмен в капиллярно-пористых телах.— М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. [4]. Шубин Г. С. Экспериментальное исследование тепло- и массообмена при высокотемпературной конвективной сушке плоских древесных материалов // Сб.: Тепло- и массоперенос.— Минск, 1961.— т. 4.

УДК 624.011.1

ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЧЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПОЖАРЕ

Р. И. РЫКОВ, Б. Ц. ЦЫРЕНЖАПОВ

Восточно-Сибирский технологический институт

Прочностные и деформативные характеристики древесины при пожаре зависят от ее влажности и температуры. Температурное поле сечения образца при испытаниях неоднородно. Более прогретые внешние части сечения обладают меньшей прочностью, и как только их температура достигает критических значений (когда несущая способность нагретой древесины равна напряжениям от нагрузки), они разрушаются. Тогда напряжение в оставшейся, менее нагретой, части возрастает.

В работе [8] приведены сведения об изменении влажности древесины при нагреве; эти данные использованы для оценки состояния деревянной конструкции. В реальной конструкции влажность сечения древесины на глубине 4 см и больше от внешней грани сечения изменяется незначительно. Наблюдается даже повышение влажности во внутренней части сечения из-за двусторонней миграции влаги при нагреве.

На рис. 1 показаны графики изменения влажности древесины, построенные по результатам исследований, приведенных в работах [5] и [7].

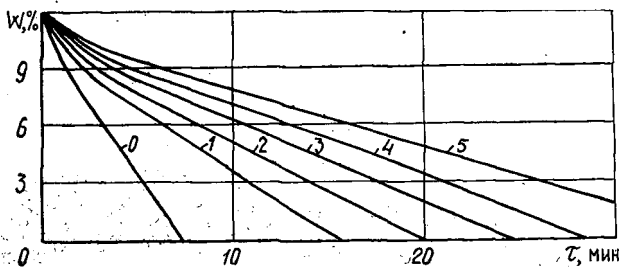


Рис. 1. Зависимость влажности W в сечениях деревянных конструкций от продолжительности пожара τ : 0—5 — номера слоев (от поверхности) толщиной $\Delta b = 0,5$ см (0 — внешняя грань сечения; 1—5 — соответственно на расстоянии 1—5 см от внешней грани)

Уравнение, полученное в результате аппроксимации экспериментальных данных для конструкции прямоугольного сечения с площадью bh и начальной влажностью $W_0 = 12\%$ в блоках $\Delta b = 0,5$ см, имеет вид:

$$W_i(\tau) = 12 - \frac{1,5}{i} \tau;$$

а среднее значение влажности сечения в зависимости от времени τ

$$W(\tau) = 12 - \frac{0,03}{b + 2\alpha\tau} \tau,$$

где i — номер слоя;
 α — скорость обугливания.