

но и уменьшает долговечность пильной рамки. Поэтому нормирование натяжения пил остается актуальной задачей. Сила натяжения невальцованных рамных пил по условиям устойчивости не должна превышать 60 кН и вальцованных — 85 кН.

Рассмотренную методику оценки устойчивости рамных пил можно также использовать при исследовании пил других типов (например, ленточных).

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Болотин В. В. Динамическая устойчивость упругих систем.— М.: Гостехиздат, 1956.— 600 с. [2]. Вибрации в технике: Справочник: В 6 т. / Под ред. В. В. Болотина.— М.: Машиностроение, 1978.— Т. 1.— 352 с. [3]. Дерягин Р. В. О динамической устойчивости рамных пил // Лесн. журн.— 1969.— № 5.— С. 89—94. (Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Дерягин Р. В., Сидорков В. М. Экспериментальная установка для исследования частот собственных колебаний и прогиба рамных пил // Науч. тр. ЦНИИМОД.— Архангельск, 1969.— Вып. 23.— С. 208—211. [5]. Прочность, устойчивость колебания: Справочник: В 3 т. / Под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко.— М.: Машиностроение, 1968.— Т. 3.— 567 с.

Поступила 7 июня 1984 г.

УДК 66.047

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КАМЕРНОЙ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ

З. Ю. МАЗЯК, И. Н. ИЛЬКИВ

Львовский политехнический институт

Камерную сушку древесины реализуют согласно разработанным стандартным режимам [2, 10], на основании которых температурно-влажностную характеристику среды на каждой стадии поддерживают постоянной. В литературе [5] отмечают, что использование переменных режимов может существенно улучшить технико-экономические показатели работы эксплуатируемого оборудования. Однако на практике такие режимы не используются, что связано, по-видимому, с их недостаточной изученностью и отсутствием соответствующих методов и приборов. Это особенно важно в тех случаях, когда имеют дело со сравнительно толстыми образцами трудносохнущих продуктов, для качественного высушивания которых необходимо продолжительное время, что обуславливает большие энергетические затраты [7]. Такая ситуация наблюдается и при сушке пиломатериалов.

Ряд авторов [4, 8] приводят экспериментальные данные, подтверждающие целесообразность использования переменных режимов при сушке древесины.

Узкое место процесса камерной сушки древесины — внутренний массоперенос в твердом пористом теле. Процесс приходится вести в высоковлажностной среде, чтобы уменьшить внешний влагообмен и сбалансировать его с внутренним массопереносом. Отсутствие такого баланса ведет к порче высушиваемого материала, поскольку развиваемые внутренние напряжения превышают предел прочности [11].

При стандартных режимах движущая сила внутреннего массопереноса — градиент диффузии. Переменные режимы позволяют интенсифицировать внутренний массоперенос за счет использования эффекта термодиффузии, положительное действие которого имеет место только в том случае, когда температура в центре материала выше, чем на поверхности. Заметная интенсификация внутреннего массопереноса в таком случае связана с тем, что в условиях камерной сушки термоградиентный коэффициент δ для пиломатериалов может достигать значе-

ний, равных 0,05 1/град и более [8]. Для того чтобы выявить экстремальный интервал использования переменных режимов, необходимо сначала изучить характер нестационарных полей температур и влагосодержаний, развивающихся в твердых пористых телах в процессах сушки. Такое изучение целесообразно осуществить, используя ЭВМ.

Исследование динамики процесса сушки на ЭВМ возможно на основе системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса [6], которая для одномерной пластины при отсутствии градиента общего давления имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{\tau} \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\varepsilon r_c}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau}; \quad (1)$$

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

Для характеристики конкретного технологического процесса необходимо сформулировать краевые условия.

Начальные условия

$$t|_{\tau=0} = t_0; \quad (3)$$

$$u|_{\tau=0} = u_0. \quad (4)$$

Граничные условия. Для симметричной задачи ($x = 0$)

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0} = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=0} = 0. \quad (5)$$

Условия на внешней границе ($x = R$)

$$\alpha_{\tau} (t_{\text{н}} + \Delta t \cos 2\pi\nu\tau - t_{\text{н}}) = \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=R} + (1 - \varepsilon) r_c k \rho_0 R (\omega - u_p); \quad (6)$$

$$- a_m \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=R} + \delta \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=R} \right] = kR (\omega - u_p). \quad (7)$$

Среднее по объему влагосодержание материала

$$\omega = \frac{1}{R} \int_0^R u dx. \quad (8)$$

Изменение коэффициента влагопроводности a_m , м²/с, термоградиентного коэффициента δ , 1/град, и критерия испарения ε можно оценить с помощью зависимостей [1]:

$$a_m = a_{m_0} (1 + k_m u) \left(\frac{T}{273} \right)^{14}; \quad (9)$$

$$\delta = \frac{A u^2}{\varepsilon B u}; \quad (10)$$

$$\varepsilon = e^{-b u}. \quad (11)$$

В формулах (1) ... (11) обозначено:

t_0 , t — температура материала соответственно начальная и текущая, град;

τ — время, с;

α_{τ} — коэффициент температуропроводности, м²/с;

x — текущий линейный размер, м ($0 \leq x \leq R$);

R — половина толщины пластины, м;

r_c — скрытая теплота испарения, Дж/кг влаги;

- c — теплоемкость материала, Дж/кг · град;
 u_0 и u — влагосодержание материала начальное и текущее, кг влаги/кг сухого материала;
 α_T — коэффициент теплоотдачи, Вт/м² · град;
 t — температура центра колебания среды, град;
 Δt — отклонение температуры среды от t_c , град;
 ν — частота колебания;
 t_s — температура поверхности материала, град;
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/м · град;
 k — коэффициент сушки, 1/с;
 ρ_0 — плотность сухого материала, кг/м³;
 ω — среднее по объему влагосодержание материала, кг влаги/кг сухого материала;
 k_m, A, B, b — константы, определяемые на основании экспериментальных данных;
 u_p — равновесное влагосодержание материала, кг влаги/кг сухого материала;
 a_{m_0} — коэффициент диффузии в начальный момент времени, м²/с;
 T — температура материала, К.

Равновесное влагосодержание материала зависит от температуры материала и влагосодержания газовой среды; задают его обычно в виде таблицы. При определении соответствующего значения ω на основании таблицы используют формулу Лагранжа [3] для произвольно заданных узлов интерполирования.

Разработанную математическую модель процесса исследовали на ЭВМ с целью выявления оптимального интервала использования переменных режимов. Для этого дифференциальные уравнения были заменены уравнениями в конечных разностях [9].

Как показали исследования, для того чтобы можно было воспользоваться положительным эффектом термодиффузии, переменный режим целесообразно реализовать, используя способ тепловых волн, при котором интенсивность теплообмена в камере изменяется согласно закону гармонических колебаний, реализуемых по асимметричной косинусоиде. Возникает экстремальная задача: до какой температуры охлаждать материал при заданной температуре нагрева с тем, чтобы максимально интенсифицировать внутренний массоперенос.

Исследования проводили при различных амплитудах и частотах температурных колебаний газовой среды, разных значениях термоградиентного коэффициента и различных толщинах высушиваемого материала. Максимальное влагосодержание поверхностного слоя заготовки при влагосъеме, соответствующем стандартному режиму, получено при условии максимального перепада температур между центром и поверхностью материала при неизменной температуре центра. В таком случае поверхностный слой высушиваемого материала наиболее равномерно во времени питается влагой за счет внутреннего массопереноса.

Такой режим выгодно отличается от переменных режимов [8] (в которых допускается понижение температуры центра материала) тем, что интенсивность внутреннего переноса практически на протяжении всего времени влагоудаления выше, чем при стандартном режиме, и высушиваемый материал охлаждается меньше; это положительно сказывается на интенсификации внутреннего массопереноса (с понижением температуры материала уменьшается коэффициент влагопроводности). Поэтому можно ожидать, что затраты тепла на процесс сушки будут ниже, чем при стандартных режимах (затраты тепла на процесс при переменных режимах с понижением температуры центра материала выше, чем при стандартных режимах) [8].

Использование переменных режимов с понижением температуры центра имеет еще тот недостаток, что при последующем после охлаждения нагреве температура поверхности материала становится выше температуры центра, в результате влагосодержание в поверхностном слое понижается, увеличивается перепад влагосодержания между центром и поверхностью и возрастают механические напряжения; это отрицательно сказывается на качестве высушиваемого материала. Эффективность переменных режимов повышается с увеличением толщины материала.

На основании полученной информации в оптимальном интервале реализовали сушку черновых заготовок мебельного производства в промышленных условиях в металлических и кирпичных камерах периодического действия при переменных режимах. В качестве максималь-

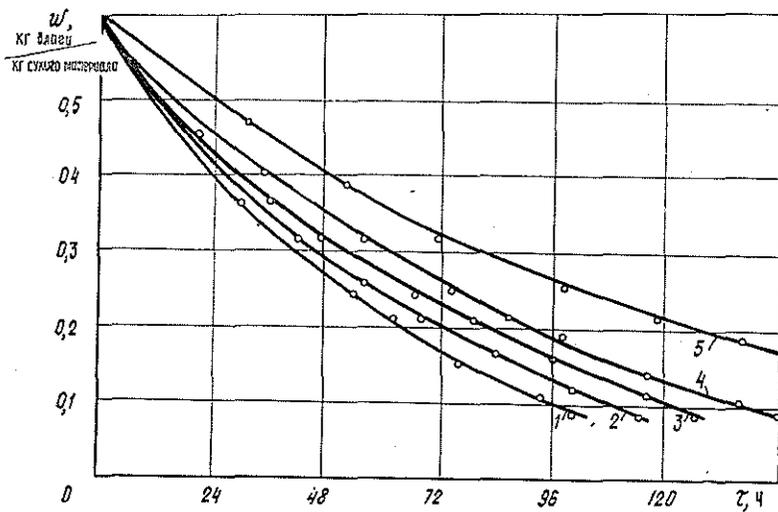


Рис. 1

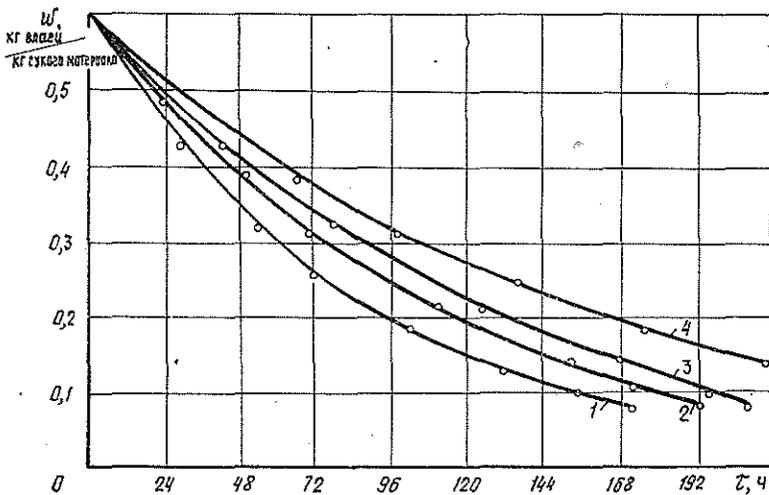


Рис. 2

Но- мер кинети- ческой кривой	Но- мер ста- дии	Температура					
		среды		поверхности материала		центра материала	
		максимальная	минимальная	максимальная	минимальная	максимальная	минимальная
1	1	$\frac{68}{54}$	$\frac{63}{48}$	$\frac{67}{53}$	$\frac{64}{50}$	$\frac{66}{52}$	$\frac{66}{52}$
	2	$\frac{73}{57}$	$\frac{67}{52}$	$\frac{71}{56}$	$\frac{68}{53}$	$\frac{70}{55}$	$\frac{70}{55}$
	3	$\frac{75}{74}$	$\frac{70}{67}$	$\frac{74}{71}$	$\frac{71}{68}$	$\frac{73}{70}$	$\frac{73}{70}$
	4	$\frac{78}{-}$	$\frac{73}{-}$	$\frac{76}{-}$	$\frac{74}{-}$	$\frac{75}{-}$	$\frac{75}{-}$
	5	$\frac{82}{-}$	$\frac{77}{-}$	$\frac{81}{-}$	$\frac{78}{-}$	$\frac{80}{-}$	$\frac{80}{-}$
2	1	$\frac{68}{55}$	$\frac{63}{47}$	$\frac{65}{53}$	$\frac{64}{49}$	$\frac{66}{52}$	$\frac{66}{50}$
	2	$\frac{72}{58}$	$\frac{67}{51}$	$\frac{69}{57}$	$\frac{69}{52}$	$\frac{70}{55}$	$\frac{70}{54}$
	3	$\frac{75}{72}$	$\frac{70}{65}$	$\frac{72}{71}$	$\frac{71}{66}$	$\frac{73}{70}$	$\frac{73}{68}$
	4	$\frac{78}{-}$	$\frac{73}{-}$	$\frac{75}{-}$	$\frac{74}{-}$	$\frac{75}{-}$	$\frac{75}{-}$
	5	$\frac{82}{-}$	$\frac{77}{-}$	$\frac{79}{-}$	$\frac{78}{-}$	$\frac{80}{-}$	$\frac{80}{-}$
3	1	$\frac{68}{57}$	$\frac{61}{47}$	$\frac{67}{55}$	$\frac{62}{49}$	$\frac{66}{53}$	$\frac{64}{50}$
	2	$\frac{72}{60}$	$\frac{66}{50}$	$\frac{71}{58}$	$\frac{67}{51}$	$\frac{70}{56}$	$\frac{68}{53}$
	3	$\frac{75}{75}$	$\frac{69}{65}$	$\frac{74}{73}$	$\frac{70}{66}$	$\frac{73}{72}$	$\frac{72}{69}$
	4	$\frac{78}{-}$	$\frac{71}{-}$	$\frac{77}{-}$	$\frac{72}{-}$	$\frac{75}{-}$	$\frac{73}{-}$
	5	$\frac{83}{-}$	$\frac{76}{-}$	$\frac{82}{-}$	$\frac{77}{-}$	$\frac{80}{-}$	$\frac{78}{-}$
4	1	$\frac{71}{52}$	$\frac{61}{-}$	$\frac{70}{-}$	$\frac{62}{-}$	$\frac{66}{-}$	$\frac{63}{-}$
	2	$\frac{75}{55}$	$\frac{65}{-}$	$\frac{74}{-}$	$\frac{66}{-}$	$\frac{70}{-}$	$\frac{67}{-}$
	3	$\frac{78}{70}$	$\frac{68}{-}$	$\frac{77}{-}$	$\frac{70}{-}$	$\frac{73}{-}$	$\frac{71}{-}$
	4	$\frac{81}{-}$	$\frac{70}{-}$	$\frac{80}{-}$	$\frac{71}{-}$	$\frac{75}{-}$	$\frac{72}{-}$
	5	$\frac{85}{-}$	$\frac{75}{-}$	$\frac{84}{-}$	$\frac{76}{-}$	$\frac{80}{-}$	$\frac{77}{-}$

Примечание. В числителе — данные для сосны; в знаменателе — для бука.

ных значений температур нагрева материала принимали их значения на основе стандартных режимов. Температуру в центре материала и на поверхности фиксировали с помощью термопар и многоточечного потенциометра (в камере устанавливали несколько замерных участков). Относительную влажность газовой среды поддерживали близкой к стандартным режимам.

На рис. 1 изображены кривые сушки образцов сосны (размер $60 \times 70 \times 1920$ мм), на рис. 2 — кривые сушки образцов бука (размер $55 \times 55 \times 580$ мм). Все кривые получены на основе осредненных экспериментальных данных при условиях, представленных в таблице.

Переменные температуры поверхности материала достигались за счет соответствующих продолжительностей периодов нагрева и охлаждения, охлаждение сушилок осуществляли за счет испарения влаги и теплопогерь в окружающую среду через теплоизоляцию. На рис. 1 кривая 1 получена для более высокой температуры поверхности материала, чем 2, при близких значениях центра материала. Кривая 3 и еще в большей мере кривая 4 получены при понижении температуры центра материала. Кривая 5 представляет стандартный режим. Характер кривых сушки согласуется с выводами, полученными при исследовании процесса.

На рис. 2 кривая 1 получена при близких температурах в центре и наиболее высокой температуре поверхности по сравнению с кривыми 2 и 3. Кривая 2 и в еще большей мере кривая 3 получены при понижении температуры центра материала. Кривая 4 представляет стандартный режим.

Реализация рекомендуемых переменных режимов в производственных условиях позволяет экономить тепло и электроэнергию, затрачиваемые на процесс влагоудаления. Экономический эффект при этом составляет примерно 6 тыс. р. в год на 1 камеру.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Гаврилова Р. И. Аналитическое решение кинетики процесса сушки с переменными коэффициентами тепло- и массопереноса: Автореф. дис... канд. техн. наук.— Минск, 1968.— 18 с. [2]. ГОСТ 19773—84. Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия.— М.: Изд-во стандартов, 1984.— 13 с. [3]. Демидович Б. Л., Марон И. Н. Основы вычислительной математики.— М.: Наука, 1970.— 663 с. [4]. Кречетов И. В. Сушка древесины.— М.: Лесн. пром-сть, 1980.— 431 с. [5]. Лыков А. В. Теория сушки.— М.: Энергия, 1968.— 470 с. [6]. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса.— М.: Теплоэнергоиздат, 1963.— 535 с. [7]. Мазяк З. Ю. Исследование процесса конвективной сушки пищевых продуктов при переменном режиме: Автореф. дис... канд. техн. наук.— М., 1969.— 26 с. [8]. Мингазов М. Г., Качалин Н. В. Осциллирующие режимы сушки пиломатериалов.— М.: ВНИПИЭИлеспром, 1976.— 49 с. [9]. Саульев В. К. Интегрирование уравнений параболического типа методом сеток.— М.: Физматгиз, 1960.— 324 с. [10]. Серговский П. С. Режимы и проведение камерной сушки пиломатериалов.— М.: Лесн. пром-сть, 1976.— 135 с. [11]. Уголев Б. Н., Лапшин Ю. Г., Кротов Е. В. Контроль напряжений при сушке древесины.— М.: Лесн. пром-сть, 1980.— 205 с.

Поступила 24 марта 1986 г.