

УДК 674.047.3:519.711.2

М. В. Сырец, аспирант (БГТУ)

ДИНАМИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАМЕРЫ ДЛЯ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ РАЗМЫТЫХ ПАРАМЕТРОВ

В статье рассматривается динамическая математическая модель камеры для конвективной сушки пиломатериалов. Выделяются регулируемые параметры и управляющие воздействия, а также характеризуются основные, действующие на объект возмущения. Затем описываются процессы, происходящие при сушке древесины: теплообмен в камере, увлажнение и кондиционирование воздуха, аэродинамика в камере, испарение влаги с поверхности древесины и движение влаги внутри нее. Для всех процессов записываются уравнения, описывающие их динамику. Где это возможно, выводятся передаточные функции. По причине большого количества возмущений и размытости параметров для процессов аэродинамики, испарения и движения влаги в древесине удалось выделить лишь структуру модели.

The article deals with dynamic mathematical model for convective drying chamber timber. Provision is governed by the parameters and control actions, and also describes the major acting on the object of indignation. Then describes the processes occurring during drying of wood: heat transfer in the chamber, humidifying and air-conditioning, aerodynamics in the chamber, the evaporation of moisture from the wood surface and the movement of moisture within it. For all the processes are written the equations describing their dynamics. Where possible - output transfer functions. Due to the large number of disturbances and blur parameters for the processes of aerodynamics, evaporation and movement of moisture in the wood was able to extract only the structure of the model.

Введение. В настоящее время важную роль в деревообработке играет сушка пиломатериалов. При управлении сушильными камерами ставятся две противоречащие друг другу задачи:

- 1) сокращение времени сушки;
- 2) минимизация выхода брака из-за деформации пиломатериалов, вызванной неравномерностью распределения влаги, как по штабелю, так и внутри одной доски.

Поиск оптимального решения данных задач невозможен без адекватной математической модели объекта.

Основная часть. Камеры для конвективной сушки пиломатериалов могут иметь различные конструкции, но большинство из них близки к приведенной ниже.

Сушильным агентом является воздух, циркуляция которого по камере реализуется одним или несколькими вентиляторами. Обычно с некоторой периодичностью двигатели вентиляторов реверсируют. Также с целью экономии энергии в различные периоды процесса можно уменьшать скорость вентиляторов при помощи инверторов.

Предназначенные для сушки доски укладывают в штабели и размещают внутри камеры. Правильность формирования и укладки штабелей значительно влияет на аэродинамику во время процесса, а значит, на его качество и скорость.

Нагрев воздуха, как правило, производится калорифером. В качестве теплоносителя используется горячая вода или насыщенный пар.

Также при высокотемпературной сушке возможно использование в этих целях перегретого пара или топочных газов, подаваемых непосредственно в камеру (рис. 1).

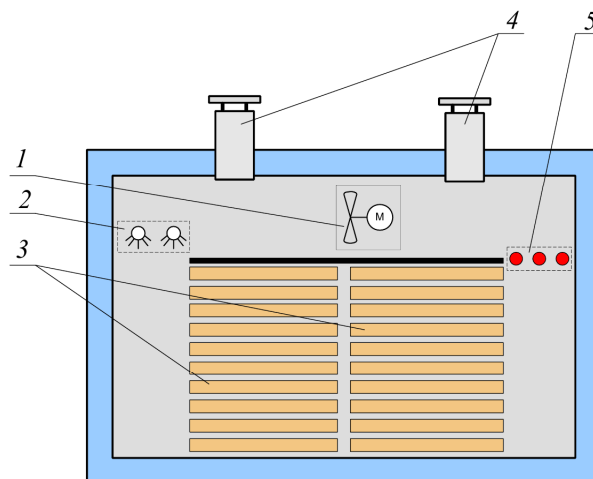


Рис. 1. Устройство сушильной камеры:
1 – вентилятор; 2 – система увлажнения (распыление воды); 3 – штабели древесины; 4 – приточно-вытяжные каналы; 5 – калорифер

С целью поддержания заданного климата в сушилке необходимо регулировать влажность воздуха. Для удаления лишней влаги (кондиционирования) открываются задвижки на приточно-вытяжных каналах. Воздух в камере заменяется менее насыщенным из окружающей среды. Чтобы повысить влажность, подается насыщенный пар, либо холодная вода под нормальным или повышенным давлением [1].

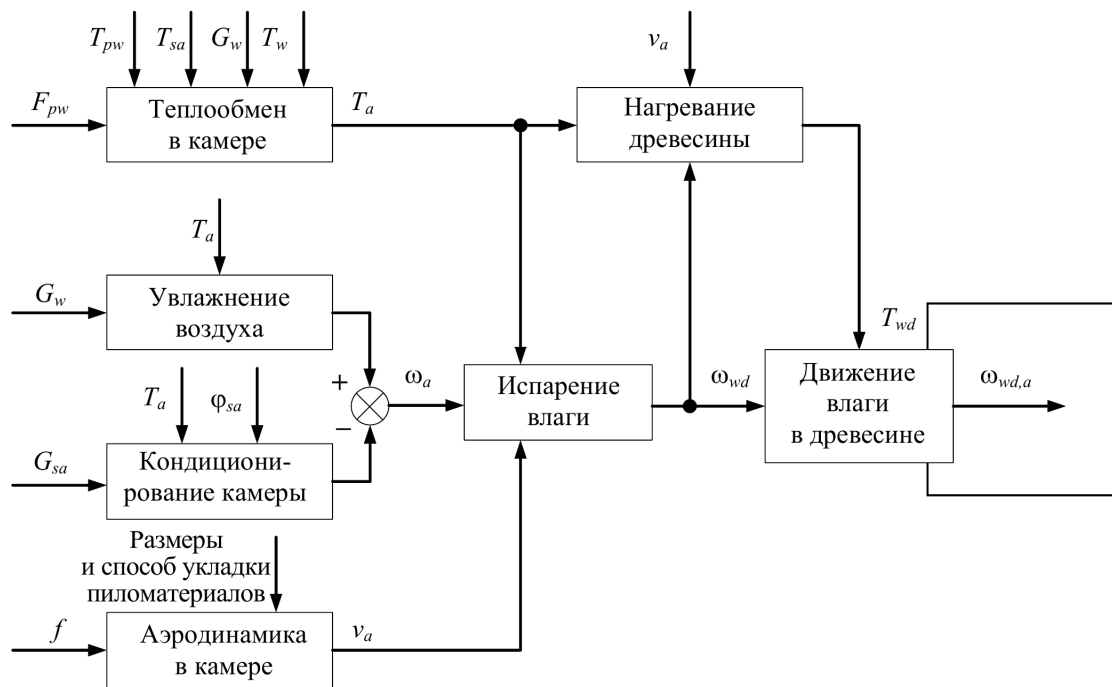


Рис. 2. Структура процесса сушки древесины как объекта управления

Процесс сушки древесины как объект управления представляет собой совокупность тепловых, массообменных и аэродинамических процессов и эффектов. Связи между ними сложны, а сами процессы описываются нелинейными и дифференциальными уравнениями с распределенными параметрами. Структуру процесса в целом можно наблюдать на рис. 2.

Управляющими воздействиями являются F_{pw} , G_w , G_{sa} , f – соответственно расход теплоносителя, масса увлажняющей воды, масса прошедшего через приточный канал воздуха и частота вращения двигателя вентилятора. Измеряемые регулируемые параметры: T_a , ω_a , ω_{wd} – соответственно температура и равновесная влажность воздуха в камере и влажность древесины. Возмущающие воздействия: T_{pw} , T_{sa} , T_w , ϕ_{sa} – соответственно температуры теплоносителя, окружающей среды, увлажняющей воды и влажность наружного воздуха.

Температура воздуха в камере регулируется клапаном на трубопроводе первичного теплоносителя на входе в калорифер. Уравнение теплового баланса для сушилки можно записать в виде

$$P_{pw} - P_k - P_m - P_{wd} - P_{sa} = C_V \frac{dT_a}{dt}, \quad (1)$$

где P_{pw} , P_k , P_m , P_{wd} , P_{sa} – соответственно тепловая мощность, подводимая теплоносителем; затрачиваемая на нагрев калорифера, нагрев стенок камеры, нагрев древесины и теплообмен стенок камеры с окружающей средой; C_V – объемная теплоемкость агента сушки.

Данные показатели в свою очередь равны:

$$P_{pw} = C_w F_{pw} (T_{pw} - T_{sw}), \quad (2)$$

$$P_k = C_k m_k (T_{pw} - T_k), \quad (3)$$

$$P_m = C_m m_m (T_a - T_m), \quad (4)$$

$$P_{wd} = \alpha_{wd} S_{wd} (T_a - T_{wd}), \quad (5)$$

$$P_{sa} = \alpha_{sa} S_m (T_m - T_{sa}), \quad (6)$$

где C_w , C_k , C_m – соответственно теплоемкости воды, материала стенок калорифера и камеры; m_k , m_m – соответственно массы стенок калорифера и камеры; α_{wd} , α_{sa} – соответственно коэффициенты теплопередачи древесины и стенок камеры в окружающую среду; S_{wd} , S_m – соответственно поверхности древесины и стенок камеры [2].

Подставив выражения (2)–(6) в дифференциальное уравнение (1) и преобразовав по Лапласу при нулевых начальных условиях, можно получить передаточные функции по различным каналам, которые будут иметь вид

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}. \quad (7)$$

Постоянная времени будет равна:

$$T = \frac{C_V}{C_m m_m + \alpha_{wd} S_{wd}}, \quad (8)$$

а коэффициенты передачи:

– по каналу: расход теплоносителя – температура в камере

$$k = \frac{C_{pw}(T_{pw} - T_{sw})}{C_m m_m + \alpha_{wd} S_{wd}}; \quad (9)$$

– по каналу: температура теплоносителя – температура в камере

$$k = \frac{C_{pw} F_{pw} - C_k m_k}{C_m m_m + \alpha_{wd} S_{wd}}; \quad (10)$$

– по каналу: температура окружающей среды – температура в камере

$$k = \frac{-\alpha_{sa} m_m}{C_m m_m + \alpha_{wd} S_{wd}}. \quad (11)$$

Чтобы учесть возмущение, вызванное увлажнением камеры холодной водой, выражения (1)–(6) дополним P_w – мощностью, затрачиваемой на ее нагрев и испарение:

$$P_w = C_w \frac{dG_w}{dt} (100 - T_w) + r_w \frac{dG_w}{dt}, \quad (12)$$

где G_w , T_w , C_w , r_w – соответственно масса, температура, теплоемкость и теплота парообразования увлажняющей воды.

Полученные передаточные функции имеют следующий вид:

1) по каналу: масса воды – температура воздуха

$$W(p) = \frac{kp}{Tp + 1}, \quad (13)$$

$$k = \frac{-(C_w(100 - T_w) + r_w)}{C_m m_m + \alpha_{wd} S_{wd}}; \quad (14)$$

2) по каналу: температура воды – температура воздуха передаточная функция аналогична (7) с коэффициентом передачи:

$$k = \frac{C_w \left(\frac{\Delta G_w}{\Delta t} \right)}{C_m m_m + \alpha_{wd} S_{wd}}. \quad (15)$$

Постоянная времени в обоих случаях определяется выражением (8).

Следует отметить, что практически каждый параметр в полученных передаточных функциях зависит от коэффициента теплопередачи α_{wd} , который не может быть определен с достаточной точностью, так как теплообмен конвективный и на него влияет укладка пиломатериалов в штабеля, распределение скоростей воздуха по камере. Значит, математическая модель теплообмена описывается уравнениями с размытыми параметрами.

Аэродинамический расчет сушильной камеры позволит получить связь между частотой двигателей, вращающих вентиляторы, и скоростью потока воздуха у поверхности пиломатериала. Этот параметр, в свою очередь, влияет на

конвективный теплообмен между воздухом и древесиной и на интенсивность испарения влаги с ее поверхности.

По каналу: частота двигателей – скорость воздуха передаточная функция записывается в виде

$$W(p) = k = \frac{v_a}{f}, \quad (16)$$

где v_a – скорость воздуха на выходе из штабеля, определяемая исходя из скорости воздуха непосредственно после вентиляторов и потерь давления на трение и местные сопротивления:

$$v_a = v_1 \sqrt{1 - \lambda \frac{l}{d_e} - \sum \xi},$$

здесь v_1 рассчитывается из соотношения

$$v_1 = \frac{V_{ном} f}{A_1 \cdot 50},$$

где $V_{ном}$ – суммарный номинальный расход, создаваемый вентиляторами; A_1 – сечение канала со скоростью v_1 ; λ – коэффициент трения; d_e – эквивалентный диаметр канала; ξ – коэффициент местных сопротивлений [3].

Точность данного расчета невысока из-за невозможности найти соответствие между табличными местными сопротивлениями и фактической укладкой пиломатериалов в штабеля.

Климат внутри камеры является самым важным критерием ее качественной работы. Характеризуется различными параметрами:

– d – влагосодержание воздуха: отношение массы водяного пара к массе сухого воздуха. Линейно связано с количеством увлажняющей воды;

– φ – степень насыщения воздуха водяным паром (иногда заменяется температурой влажного термометра или психрометрической разностью при известной температуре воздуха). Зависимости между этими параметрами уже известны, представляются в литературе в виде табличных данных либо номограмм. Их линеаризация оказывается возможной лишь при малых приращениях;

– ω_a – равновесная влажность воздуха соответствует уравновешенной с ней влажности древесины при определенной температуре, т. е. это влажность, к которой стремится древесина при заданном климате.

Зависимость между равновесной влажностью, степенью насыщения и температурой наиболее точно выражается следующими уравнениями [3]:

1) для $\varphi = 0-0,5$:

$$\omega_a = \omega_0 + 0,72\varphi \left(29,5 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^2 \right), \quad (17)$$

где

$$\omega_0 = 0,36 \left(13,9 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^2 \right);$$

2) для $\varphi = 0,5-1$:

$$\omega_a = \frac{0,512}{1,21 - \varphi} \left(21,7 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^2 \right). \quad (18)$$

Испарение влаги с поверхности древесины при влажности выше точки гигроскопичности (~30%) зависит от разности давлений насыщенного пара и пара в окружающем воздухе [3]:

$$\frac{m_{wd}}{S_{wd}} \frac{d\omega_{wd}}{dt} = -c(p_n - p_a), \quad (19)$$

где $c = 0,0017 + 0,0013v_a$.

Значит, интенсивность испарения влаги зависит от скорости воздуха у поверхности древесины.

В уравнении (19) m_{wd} , p_n и p_a – соответственно масса высушиваемой древесины, давление насыщенного пара и пара в воздухе. Поскольку при постоянной температуре давление насыщенного пара постоянно, а давление пара зависит от влажности воздуха, то по каналу: влажность воздуха – влажность древесины у поверхности процесс описывается интегральным звеном последовательно с нелинейным. При высыхании поверхности ниже точки гигроскопичности в уравнении (19) вместо p_n появится выражение, зависящее от влажности древесины [3], и звено превратится в апериодическое.

Стоит отметить, что все приведенные зависимости справедливы для одной пластины, а значит, для сушки пиломатериалов в штабелях фактические численные значения параметров модели, скорее всего, не будут соответствовать расчетным.

На движение влаги влияет также неодинаковая микро- и макроструктура древесины различных пород или в разных частях ствола, плотность, а также направление вектора основного потока влаги к главным структурным направлениям ствола и т. д. Таким образом, виды влаги, движущие силы и закономерности ее передвижения в древесине многообразны и сложны [3]. А это значит, что четкую математическую модель для этого процесса получить нельзя.

Потенциалом переноса влаги в древесине при изотермических условиях является градиент влажности с различными коэффициентами влагопроводности, зависящими от значений температуры и влажности древесины, направления потока влаги, плотности древесины и других факторов.

Движущей силой сушки древесины выступает разность ее влажности и равновесной влажности воздуха. Самой важной частью модели является динамическая зависимость между этими величинами.

Значит, четкую модель сушки древесины расчетным методом получить нельзя. Можно лишь предположить структуру модели, оценив кинетику сушки древесины и сравнив кривые сушки с переходными характеристиками типовых звеньев (рис. 3).

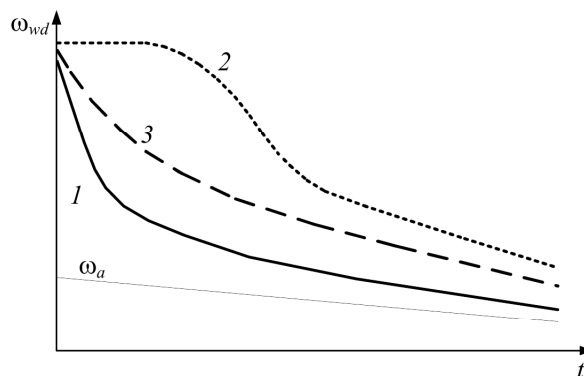


Рис. 3. Кинетика сушки пиломатериалов:

- 1 – в наружных штабелях;
- 2 – во внутренних штабелях;
- 3 – средняя влажность по камере

В наружных штабелях камеры влажность древесины зависит от влажности воздуха по зависимости, близкой к апериодическому звену, во внутренних – к апериодическому с запаздыванием.

Заключение. Получение динамической математической модели процесса сушки древесины представляет собой сложную задачу. Большинство зависимостей, описывающих процесс, – нелинейные. Параметры в приведенных выражениях зависят от большого количества факторов и не могут быть четко определены. Следовательно, камера для конвективной сушки древесины является объектом с размытыми параметрами и управление ею требует соответствующего подхода.

Для получения параметров модели конкретной сушильной камеры необходимо использовать экспериментальные методы.

Литература

1. Деревообработка. Технологии деревообработки [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.woodtechnology.ru/category/obrabotka-drevesiny/sushka-drevesiny>. – Дата доступа: 05.01.2010.
2. Палагин, В. А. Автоматика и автоматизация производственных процессов деревообработки / В. А. Палагин, В. А. Дорошенко, Л. В. Леонов. – М.: Экология, 1993. – 352 с.
3. Кречетов, И. В. Сушка древесины / И. В. Кречетов. – М.: Лесная пром-сть, 1980. – 432 с.

Поступила в редакцию 31.03.2010