

УДК 674.04.047.3

**О. Г. Рудак**, младший научный сотрудник (БГТУ);  
**Н. В. Мазаник**, кандидат технических наук, старший преподаватель (БГТУ);  
**В. Б. Снопков**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ)

### ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ НАЧАЛЬНОГО ПРОГРЕВА В НЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ

В статье приведены результаты эксперимента по прогреву древесины в ненасыщенной среде. На основе экспериментальных данных разработана математическая модель процесса прогрева. Показано, что использование модели позволяет существенно повысить достоверность определения продолжительности данной операции.

The results of the experiment of wood heating in non-saturated environment are given. Based on the experimental data a mathematical model of the process of heating is creating. It is shown that the use of the model can significantly improve the accuracy of determining of the operation duration.

**Введение.** В условиях постоянного повышения цен на энергоносители весьма актуальной представляется задача экономии тепловой энергии в процессе обработки древесины. Как известно, одной из наиболее энергозатратных операций деревообработки является сушка пиломатериалов. При этом существенная часть энергии расходуется не на саму сушку, а на проведение начального прогрева.

В табл. 1 представлена структура расхода тепловой энергии при проведении цикла сушки сосновых досок толщиной  $S = 25$  мм в камере периодического действия марки СМ-35 фирмы «Incorplan» (Италия) для среднегодовых условий Минской области.

Таблица 1

#### Структура расхода тепловой энергии при проведении цикла сушки в камере СМ-35«Incorplan» (Италия)

Статья расхода теплоты	Доля расходуемой тепловой энергии, %	
	Для средне- годовых условий	Для зимних условий
Прогрев материала	8,9	16,9
Испарение влаги	82,1	70,2
Потери через ограждения	9,0	12,9
<i>Итого</i>	100	100

Как видно из таблицы, доля энергозатрат на начальный прогрев материала варьирует в диапазоне 9–16%, существенно возрастающая в зимний период. Следует, однако, учитывать, что на практике расход энергии на начальный прогрев зачастую оказывается значительно выше расчетного. В первую очередь это связано с неправильным определением продолжительности прогрева. Как правило, продолжительность, устанавливаемая нормативными документами, изначально дается с запасом, поскольку переход к

стадии интенсивной сушки до достижения древесины температуры среды чреват возникновением различных дефектов. К таким дефектам можно отнести не только рост внутренних напряжений и растрескивание поверхностных слоев пиломатериалов, но и так называемую «цементацию» поверхностного слоя, которая в дальнейшем препятствует свободному испарению влаги с поверхности и замедляет сушку. Превышение же необходимой продолжительности начальной обработки в свою очередь влечет большой перерасход энергии, что непосредственно отражается на себестоимости сушки. Особенно часто с такой ситуацией сталкиваются на предприятиях, которые по каким-либо причинам допускают отступления от стандартной процедуры проведения прогрева. Так, например, «Руководящие технические материалы» предписывают проводить прогрев древесины при температуре на 5–8°C выше температуры первой ступени сушки. При этом значения психрометрической разности должны находиться в диапазоне 0,5–1,5°C. Однако состояние многих сушильных камер (в частности, значительный физический износ калориферов и отсутствие увлажнительных труб) не позволяет добиться такой высокой степени насыщенности сушильного агента. В результате прогрев древесины производится в среде с неконтролируемыми параметрами относительной влажности воздуха.

**Основная часть.** Последние исследования в области тепловой обработки древесины показывают, что проведение начального прогрева материала в ненасыщенной среде в большинстве случаев позволяет уменьшить расход энергии без снижения качества обрабатываемого материала. По этой причине в последнее время все чаще практикуется проведение прогрева с применением режимов, предусматривающих использование обрабатываемого агента с от-

носителем влажностью менее 95%. Очевидно, что при использовании таких режимов продолжительность прогрева будет отличаться от определенной традиционными методами.

Как известно, существует возможность точного определения точки завершения операции начального прогрева при использовании специальных датчиков температуры древесины. Эти датчики представляют собой устанавливаемые в контрольные доски штабеля термометры сопротивления, которыми производят непрерывное измерение температуры в центре сортикета. По достижении контрольными досками температуры, заданной для данной породы древесины, процесс прогрева заканчивается и выполняется переход на первую ступень сушки. Следует, однако, учитывать, что в отличие от датчиков влажности, датчики температуры древесины не входят в стандартный комплект оборудования сушильной камеры и должны устанавливаться потребителем, что приводит к дополнительным затратам. Кроме того, большинство систем автоматического регулирования процесса сушки использование таких датчиков не предусматривает.

С учетом вышесказанного мы пришли к выводу о необходимости применения математического моделирования для прогнозирования продолжительности операции начального прогрева в ненасыщенной среде. Математическая модель была разработана на основе экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях. Эксперимент проводился в климатической камере, обеспечивающей поддержание заданной температуры и относительной влажности обрабатываемой среды. В качестве образцов использовались пиломатериалы сосны

радиальной распиловки. Варьируемыми факторами являлись:

- 1) температура обрабатываемой среды ( $T = X_1$ );
- 2) начальная влажность пиломатериалов ( $W_n = X_2$ );
- 3) толщина пиломатериалов ( $S = X_3$ ).

В качестве функции отклика рассматривалась продолжительность достижения центральным слоем древесины температуры среды.

При планировании эксперимента был использован В-план второго порядка. В соответствии с методикой [1] каждый фактор варьировался на трех уровнях, т. е. принимал в каждом опыте одно из трех значений: наименьшее  $X_{min}$ , наибольшее  $X_{max}$ , либо среднее  $X_{cp} = (X_{min} + X_{max}) / 2$ . Таким образом, при диапазоне варьирования 40–80°C температура в эксперименте устанавливалась на уровнях 40, 60, 80°C. Диапазон изменения толщин составил 20–60 мм, уровни варьирования соответственно 20, 40 и 60 мм. Диапазон изменения влажности – 30–70%, уровни варьирования соответственно – 30, 50 и 70%. План эксперимента в нормированных значениях переменных факторов представлен в табл. 2. Результаты эксперимента можно видеть в табл. 3.

На основе экспериментальных данных была определена регрессионная зависимость функции отклика от зависимых и независимых факторов.

$$\tau = 553,25 - 20,8 \cdot T - 8,95 \cdot S + 10,1 \cdot W_n + 0,12 \cdot T \cdot S - 0,032 \cdot S \cdot W_n - 0,03 \cdot T \cdot W_n + 0,18 \cdot T^2 + 0,073 \cdot S^2 - 0,013 \cdot W_n, \quad (1)$$

где  $T$  – температура обрабатываемой среды, °C;  $W_n$  – начальная влажность пиломатериалов, %;  $S$  – толщина пиломатериалов, мм.

Таблица 2

План проведения эксперимента

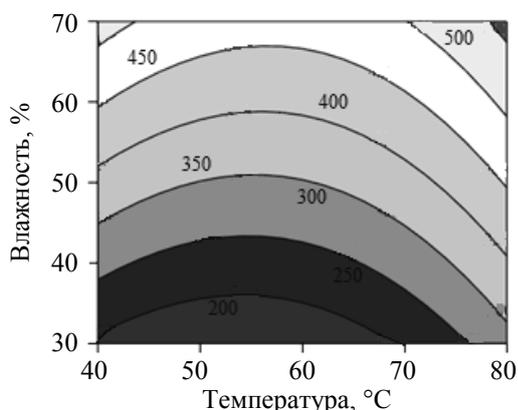
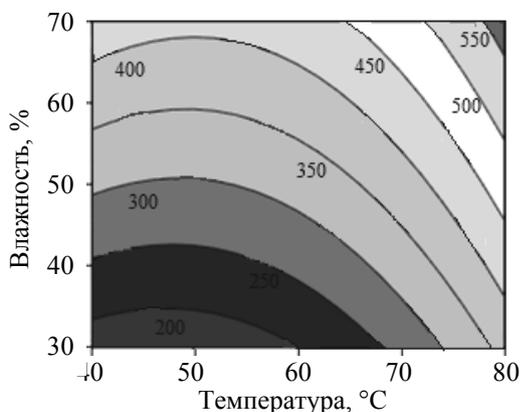
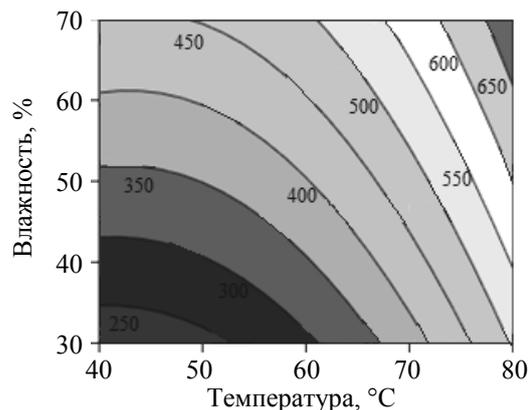
№	$X_0$	$X_1$ ( $T$ , °C)	$X_2$ ( $S$ , мм)	$X_3$ ( $W_n$ , %)	$X_1 \cdot X_2$	$X_2 \cdot X_3$	$X_1 \cdot X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
7	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
9	+1	+1	0	0	0	0	0	+1	0	0
10	+1	-1	0	0	0	0	0	+1	0	0
11	+1	0	+1	0	0	0	0	0	+1	0
12	+1	0	-1	0	0	0	0	0	+1	0
13	+1	0	0	+1	0	0	0	0	0	+1
14	+1	0	0	-1	0	0	0	0	0	+1

Таблица 3

## Результаты эксперимента

№ опыта	Уровень варьируемого фактора			Средняя продолжительность прогрева, $\tau$ , мин
	$X_1$ ( $T$ , °C)	$X_2$ ( $S$ , мм)	$X_3$ ( $W_{нз}$ , %)	
1	80	60	70	683
2	40	60	70	439
3	80	20	70	509
4	40	20	70	468
5	80	60	30	507
6	40	60	30	224
7	80	20	30	292
8	40	20	30	192
9	80	40	50	468
10	40	40	50	312
11	60	60	50	400
12	60	20	50	294
13	60	40	70	440
14	60	40	30	187

На нижеследующих поверхностях отклика, построенных на основе модели, можно видеть, как меняется продолжительность прогрева в ненасыщенной среде при фиксированном значении толщины пиломатериалов (рис. 1–3).

Рис. 1. Продолжительность прогрева при толщине пиломатериалов  $S = 20$  ммРис. 2. Продолжительность прогрева при толщине пиломатериалов  $S = 40$  ммРис. 3. Продолжительность прогрева при толщине пиломатериалов  $S = 60$  мм

Полученная зависимость позволяет прогнозировать продолжительность прогрева материалов при различных сочетаниях переменных факторов. Проверка уравнения регрессии с использованием критерия Фишера подтвердила адекватность данной модели.

Нами также был проведен сравнительный анализ продолжительности начального прогрева, определенного с использованием разработанной регрессионной модели и методик, которые в настоящее время применяются при определении продолжительности данной операции в производственных условиях (табл. 4).

Первая из этих методик, несмотря на свою примитивность, наиболее широко используется в практике сушки. В соответствии с этой методикой продолжительность начального прогрева ориентировочно принимают равной для мягких хвойных пород – 1,5 ч на каждый сантиметр толщины пиломатериалов. Для мягких лиственных пород это время увеличивают на 25%, для твердых лиственных пород – на 50% [2], т. е.  $\tau_{нп. хв} = 1,5 \cdot S$ ,  $\tau_{нп. л. листв} = 1,5 \cdot S \cdot 1,25$ ,  $\tau_{нп. тв. листв} = 1,5 \cdot S \cdot 1,5$ .

Вторая методика заключается в определении продолжительности прогрева табличным методом по формуле:

$$\tau_{нп} = \tau_{нп0} \cdot A_t \cdot A_w \cdot A_{п} \cdot A_{ш}, \quad (2)$$

где  $\tau_{нп0}$  – исходная продолжительность начального прогрева, определенная для сосновых пиломатериалов влажностью 60%, имевших начальную температуру от 0 до  $(-20)^\circ\text{C}$  и уложенных в штабель шириной 1,8 м при температуре обрабатывающей среды  $80^\circ\text{C}$  и психрометрической разности  $1^\circ\text{C}$ ;  $A_t$ ,  $A_w$ ,  $A_{п}$ ,  $A_{ш}$  – коэффициенты, учитывающие соответственно начальную температуру древесины и температуру обрабатывающей среды, категорию режима сушки, скорость циркуляции сушильного агента, влажность и породу древесины, ширину штабеля.

Таблица 4

## Результаты определения продолжительности прогрева материалов различными методами

№	Исходные данные для определения продолжительности прогрева			Продолжительность начального прогрева $\tau$ , ч, определенная			
	Температура среды $T$ , °C	Толщина пиломатериалов $S$ , мм	Начальная влажность древесины $W_{н.}$ , %	экспериментальным путем	с использованием разработанной модели	по методике приближенного расчета	табличным методом
1	80	60	70	683	684	540	255
2	40	60	70	439	448	540	225
3	80	20	70	509	514	180	111
4	40	20	70	468	470	180	98
5	80	60	30	507	505	540	220
6	40	60	30	224	221	540	194
7	80	20	30	292	284	180	96
8	40	20	30	192	192	180	85
9	80	40	50	468	473	360	183
10	40	40	50	312	309	360	162
11	60	60	50	400	398	540	210
12	60	20	50	294	298	180	92
13	60	40	70	440	428	360	173
14	60	40	30	187	199	360	150

Анализируя данные, приведенные в табл. 4, легко заметить, что значения, полученные с использованием математической модели, очень близки к экспериментальным данным, что еще раз подтверждает адекватность регрессионной зависимости. В то же время значения продолжительности начального прогрева, полученные с использованием общепринятых методик, не только существенно отличаются от экспериментальных данных, но и вдвое, и даже в некоторых случаях и больше, разнятся между собой.

**Заключение.** По результатам описанных исследований могут быть сделаны следующие выводы.

1) Расход тепловой энергии на проведение операции начального прогрева пиломатериалов в камерах периодического действия напрямую зависит от своевременности окончания данной операции.

2) Традиционные методики расчета продолжительности начального прогрева не обладают достаточной точностью и неприемлемы в случае прогрева древесины в ненасыщенной среде.

3) Для расчета продолжительности прогрева пиломатериалов в ненасыщенной среде целесообразно использовать математическую модель, полученную эмпирическим путем. Применение данной модели позволит повысить достоверность определения точки перехода от стадии прогрева к первой стадии процесса сушки и тем самым не только сократить энергозатраты, но и избежать появления дефектов.

#### Литература

1. Пижурин, А. А. Основы научных исследований в деревообработке / А. А. Пижурин, А. А. Пижурин. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. – 305 с.
2. Снопков, В. Б. Гидротермическая обработка и защита древесины. Примеры и задачи: учеб. пособие для студентов специальности «Технология деревообрабатывающих производств» / В. Б. Снопков. – Минск: БГТУ, 2005. – 240 с.

Поступила 21.02.2013