

В. Б. Снопков, доцент; Д. П. Бабич, аспирант

РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ НЕСТАНДАРТНЫМИ РЕЖИМАМИ

The method of calculation of duration of drying of saw-timbers in chambers of periodic action is developed by non-standard modes. The method includes an estimation of rigidity of a mode by means of the average gradient of drying, definition of factor of a category of a mode and the subsequent calculation of duration of drying by a tabular method.

Введение. При проведении камерной сушки пиломатериалов для определения производительности, планирования и учета работы сушильных камер необходимо рассчитывать продолжительность этого процесса. Существует достаточно много методов определения продолжительности сушки. Их можно условно разделить на три группы: эмпирические, приближенные и теоретические.

Эмпирические методы расчета разработаны И. В. Кречетовым [1], Э. А. Микитом [2] и другими авторами. Они могут применяться как для расчета продолжительности сушки пиломатериалов в штабелях, так и для определения времени высыхания отдельных сортиментов. Однако сопоставление результатов расчета продолжительности сушки этими методами с экспериментальными и производственными данными показали отсутствие удовлетворительной корреляции [3].

Приближенные методы расчета, основаны на аппроксимации экспериментальных зависимостей. К ним относятся методы А. В. Лыкова [4], Г. К. Филоненко [5] и ряда других авторов. Эти методы имеют общий недостаток: большая погрешность при определении продолжительности сушки. Кроме того, они разработаны для ограниченного круга пород и толщин пиломатериалов.

Теоретические методы расчета разработаны в Московском лесотехническом институте П. С. Серговским и Г. С. Шубиным [6]. При выводе расчетных уравнений для определения продолжительности сушки авторы использовали не практические данные, а теоретические положения общей теории сушки применительно к древесине. Благодаря своей точности и универсальности теоретические методы расчета получили широкое распространение. Существенным недостатком теоретических методов расчета является их громоздкость, большой объем вычислительной работы, а значит, и непригодность для оперативного использования в производственных условиях. С целью облегчения и ускорения выполняемых расчетов были разработаны графические зависимости, позволяющие приближенно определять входящие в расчетные формулы параметры. Так появился метод расчета продолжительности сушки пиломатериалов, получивший название «графоаналитический». В его основу положена фор-

мула, позволяющая определить продолжительность сушки пиломатериалов для каждой ступени процесса, т. е. при неизменных значениях параметров сушильного агента.

$$\tau = \frac{65 \cdot C_{\text{трц}} \cdot S^2 \cdot C \cdot A \cdot \lg(P \cdot \frac{W_n - W_p}{W_k - W_p})}{a \cdot 10^6}, \text{ ч}, \quad (1)$$

где $C_{\text{трц}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий соотношение толщины и ширины пиломатериалов; S – толщина пиломатериалов, см; C – коэффициент, учитывающий замедление сушки в штабеле; $A_{\text{рц}}$ – коэффициент реверсивной циркуляции; P – параметр, величина которого зависит от характера распределения влажности по толщине сортимента в начале данной ступени сушки; W_n , W_k , W_p – соответственно начальная, конечная и равновесная влажность пиломатериалов на данной стадии, %; a – коэффициент влагопроводности древесины, $\text{см}^2/\text{с}$.

Несмотря на сравнительную простоту приближенных уравнений графоаналитический метод все же оказался весьма трудоемким. Поэтому для выполнения производственных расчетов был разработан еще более простой метод определения продолжительности сушки, основанный на использовании набора специально составленных таблиц. Он получил название «табличный». Метод позволяет определять продолжительность цикла сушки, включая начальный прогрев и влаготеплообработку, по следующей формуле

$$\tau = \tau_{\text{исх}} \cdot A_p \cdot A_{\text{ц}} \cdot A_b \cdot A_d \cdot A_k, \text{ ч}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{исх}}$ – исходная продолжительность сушки пиломатериалов заданной породы и размеров поперечного сечения нормальными режимами при начальной и конечной влажности 60 и 12% в камерах с реверсивной циркуляцией средней интенсивности (скорость циркуляции 1 м/с), ч; A_p , $A_{\text{ц}}$, A_b , A_d , A_k – коэффициенты, учитывающие категорию режима сушки, интенсивность циркуляции сушильного агента в камере, начальную и конечную влажность древесины, длину сортиментов, категорию качества сушки.

Табличный метод расчета позволяет быстро и с приемлемой точностью определить продолжительность камерной сушки пиломатериалов и потому был рекомендован для практического применения [7]. Однако он имеет существенный

недостаток. Жесткость применяемых режимов сушки в этом методе учитывается с помощью коэффициента A_p , который может принимать три разных значения в зависимости от категории режима сушки по ГОСТ 19773–84 [8]: для мягких режимов $A_p = 1,7$, для нормальных – $A_p = 1,0$, для форсированных – $A_p = 0,8$. Однако в последнее время большинство белорусских предприятий используют для сушки пиломатериалов современные технологии и оборудование западных фирм. При этом применяют нестандартные многоступенчатые режимы, которые не могут быть отнесены ни к одной из установленных отечественными нормативными документами категорий. Таким образом, для нестандартных режимов нет возможности определить значение коэффициента A_p , а значит, нельзя рассчитать и продолжительность процесса сушки.

Целью настоящей работы явилась разработка метода расчета продолжительности сушки пиломатериалов нестандартными режимами в камерах периодического действия. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: а) определить критерий для количественной оценки жесткости применяемых режимов; б) установить связь между выбранным критерием и величиной коэффициента A_p .

Методика проведения исследований. Степень жесткости режимов сушки предложено оценивать с помощью величины градиента сушки. Градиент сушки – это отношение текущей влажности пиломатериалов к равновесной влажности древесины для заданных параметров сушильного агента. Если градиент сушки равен 1, то испарение влаги с поверхности пиломатериала не происходит, т. е. не происходит и процесс сушки. Чем больше значение градиента, тем интенсивнее испаряется влага и, соответственно, тем быстрее проходит сушка древесины.

В соответствии с определением, градиент сушки рассчитывали по формуле

$$G = \frac{W}{W_p}, \quad (3)$$

где W – текущая влажность древесины, %; W_p – равновесная влажность древесины для заданных параметров сушильного агента, %.

Поскольку влажность древесины при сушке меняется, а равновесная влажность остается неизменной, то для характеристики жесткости режима на каждой ступени была принята средняя величина градиента, которую рассчитывали по формуле

$$G_{cp} = \frac{W_{ni} + W_{ki}}{2 \cdot W_{pi}}, \quad (4)$$

где W_{ni} , W_{ki} , W_{pi} – соответственно начальная, конечная и равновесная влажность на каждой ступени сушки, %.

Для характеристики режима сушки в целом использовали величину средневзвешенного градиента сушки $G_{св}$, который рассчитывали по формуле

$$G_{св} = \frac{\sum (G_{cp,i} \cdot \Delta W_i)}{\Delta W}, \quad (5)$$

где ΔW_i , ΔW – разность начальной и конечной влажностей древесины для i -й ступени и для всего процесса соответственно, %; n – количество ступеней в режиме.

Разность конечной и начальной влажности древесины определяли по формуле

$$\Delta W_i = W_{ki} - W_{ni}. \quad (6)$$

В качестве объекта исследования были выбраны стандартные режимы низкотемпературной сушки пиломатериалов из древесины сосны, березы и дуба толщиной 19, 25, 32, 40, 50, 60 и 75 мм. В расчетах принимали: ширину пиломатериалов – 150 мм; начальную и конечную влажность древесины – 60 и 12% соответственно; скорость циркуляции сушильного агента – 1 м/с.

Для каждого режима сушки и сортамента последовательно были выполнены следующие действия:

- 1) расчет продолжительности сушки заданных пиломатериалов графоаналитическим методом [9,10];
- 2) расчет средневзвешенного градиента сушки $G_{св}$ по формулам (4–6);
- 3) определение коэффициента режима A_p с использованием преобразованной формулы (2);
- 4) выявление зависимости между средневзвешенным градиентом сушки $G_{св}$ и коэффициентом режима A_p .

Результаты исследований. Результаты расчета продолжительности сушки пиломатериалов толщиной 25 мм графоаналитическим методом обобщены в табл. 1. Аналогично выполняли вычисления и для других значений толщины пиломатериалов.

В табл. 2 представлены результаты расчета градиента сушки для этих же пиломатериалов, а также значения коэффициента категории режима сушки A_p , полученные по формуле (2). Аналогичные расчеты были проведены и для других толщин пиломатериалов.

Результаты расчетов обобщены на рисунке, где в системе координат коэффициент категории режима (A_p) – средневзвешенный градиент сушки ($G_{св}$) нанесены все расчетные точки.

Как следует из полученных результатов, при сушке пиломатериалов стандартными режимами, относящимися к мягкой, нормальной и форсированной категориям, средневзвешенный градиент сушки изменяется в диапазоне от 2 до 6. Коэффициент категории режима A_p принимает при этом значения от 0,7 до 1,8.

Таблица 1

**Расчет продолжительности сушки пиломатериалов толщиной 25 мм
графоаналитическим методом**

Порода древесины	Режим сушки	Влажность, %		Параметры режима			Продолжительность, ч			
		начальная	конечная	температура, °С	степень насыщенности	равновесная влажность, %	ступени сушки	всех ступеней сушки	начального прогрева	цикла сушки
Сосна	2-М	60	35	57	0,77	13	26,41	92,31	3,75	96,06
		35	20	61	0,62	9,4	39,96			
		20	12	77	0,29	4,8	25,94			
Сосна	2-Н	60	35	79	0,73	10,3	16,37	46,29	3,75	50,04
		35	25	84	0,59	7,8	13,48			
		25	12	105	0,26	3,5	16,43			
Сосна	2-Ф	60	35	92	0,67	8,4	11,32	35,85	3,75	39,60
		35	25	97	0,55	6,6	9,44			
		25	12	123	0,22	2,5	15,09			
Береза	Б2-М	60	35	60	0,69	14,4	30,91	97,03	4,69	101,72
		35	25	64	0,57	10	24,93			
		25	12	80	0,27	4,9	41,19			
Береза	Б2-Н	60	35	73	0,72	11,2	22,95	69,68	4,69	74,36
		35	25	77	0,58	8,1	18,56			
		25	12	96	0,24	3,5	28,16			
Береза	Б2-Ф	60	35	80	0,73	9,4	18,20	59,40	4,69	64,09
		35	25	84	0,62	7,2	15,88			
		25	12	104	0,28	2,8	25,32			
Дуб	Д2	60	35	53	0,84	16	47,99	164,36	5,63	169,99
		35	25	56	0,76	12,9	44,11			
		25	12	70	0,35	5,5	72,27			

Таблица 2

Расчет градиента сушки и коэффициента категории режима

Порода древесины	Толщина пиломате- риалов, мм	Режим сушки	Градиент сушки				Коэффици- ент режима сушки
			на 1-й ступени	на 2-й ступени	на 3-й ступени	средневзве- шенный	
Сосна	25	2-М	3,32	2,50	3,33	3,07	1,75
		2-Н	3,74	3,26	4,30	3,79	0,91
		2-Ф	4,36	3,75	6,17	4,72	0,72
Береза		Б2-М	3,30	3,00	3,78	3,37	1,23
		Б2-Н	4,24	3,70	5,29	4,41	0,90
		Б2-Ф	5,05	4,17	6,61	5,29	0,77
Дуб		Д2	2,97	2,33	3,36	2,94	1,23

Обработка экспериментальных данных, полученных для отдельных пород, позволила установить аналитические зависимости между средневзвешенным градиентом и коэффициентом категории режима:

– для древесины сосны

$$A_p = 4,5641 \cdot e^{-0,3206 G_{св}}; \quad (7)$$

– для древесины березы

$$A_p = 3,4055 \cdot G_{св}^{-0,8295}; \quad (8)$$

– для древесины дуба

$$A_p = 2,8295 \cdot G_{св}^{-0,747}. \quad (9)$$

Из приведенного выше видно, что для древесины сосны расчетное уравнение имеет экспоненциальный вид, а для древесины березы и дуба – степенной, причем показателем степени в обоих случаях является отрицательное дробное число. Применение полученных уравнений для выполнения оперативных расчетов связано с рядом трудностей. Во-первых, наличие отдельных уравнений для каждой породы древесины, что увеличивает объем необходимой для расчета информации и неудобно для практического использования. Во-вторых, велика трудоемкость расчетов при степенных и экспоненци-

альных уравнениях. В-третьих, для определения коэффициентов категории режима требуется наличие вычислительной техники.

Для того чтобы избежать перечисленных выше затруднений и упростить метод расчета, было принято решение получить обобщенную математическую зависимость коэффициента категории режима от средневзвешенного градиента сушки, справедливую для всех пород древесины.

Характер распределения расчетных точек, построенных в системе координат $A_p - G_{св}$, дает основание использовать для описания искомой зависимости линейное уравнение. В результате аппроксимации получили

$$A_p = 2,0 - 0,22 \cdot G_{св}. \quad (10)$$

Полученное уравнение отличается простотой и потому очень удобно для выполнения практических расчетов. Его достоинством является универсальность, т. е. уравнение можно

использовать при выполнении расчетов продолжительности сушки пиломатериалов различных пород и толщин.

В качестве примера проведем расчет продолжительности цикла сушки березовых пиломатериалов толщиной 25 мм, шириной 150 мм от начальной влажности 60% до конечной 12% при скорости циркуляции сушильного агента 1 м/с. Сушка проводится с применением режима фирмы «Cathild Industrie» (табл. 3) без конечной влаготеплообработки. Данный режим сушки десятиступенчатый, нестандартный, и потому для него неприменим традиционный табличный метод расчета продолжительности сушки.

Расчет проводится в следующей последовательности. По формуле (4) рассчитываем градиент сушки для каждой ступени. Результат расчета заносим в табл. 3. Определяем средневзвешенный градиент сушки по формуле (5):

$$G_{св} = \frac{4,4 \cdot 10 + 3,88 \cdot 10 + 3,50 \cdot 5 + 3,42 \cdot 5 + 3,48 \cdot 3 + 3,40 \cdot 3 + 3,26 \cdot 3 + 3,25 \cdot 3 + 3,30 \cdot 3 + 3,00 \cdot 3}{1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1} = 3,68.$$

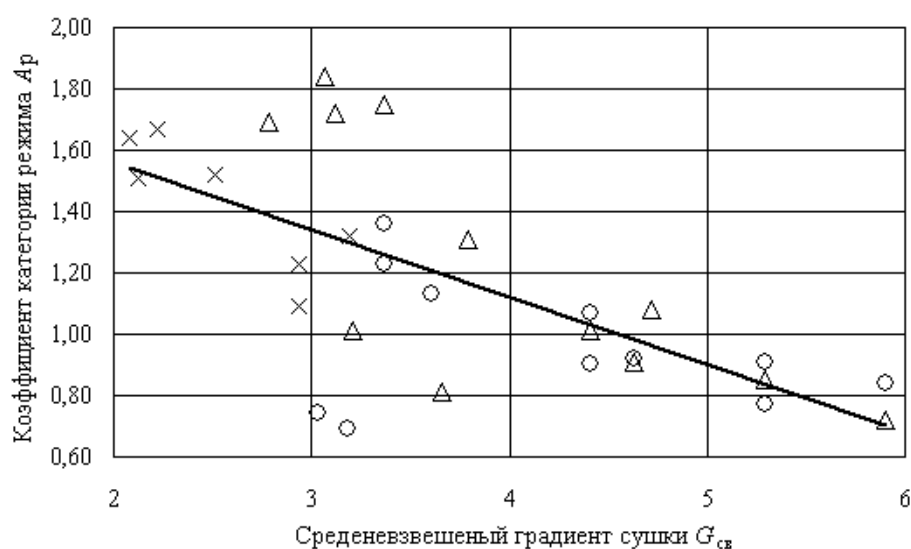


Рисунок. Зависимость коэффициента категории режима A_p от средневзвешенного градиента сушки $G_{св}$:
 Δ – сосна; \circ – береза; \times – дуб

Таблица 3

Режим сушки фирмы «Cathild Industrie»

Влажность пиломатериалов, %		Параметры режима			Градиент сушки
начальная	конечная	температура, °C	степень насыщенности	равновесная влажность	
60	50	60	0,76	12,5	4,40
50	40	60	0,73	11,6	3,88
40	35	60	0,68	10,7	3,50
35	30	60	0,62	9,5	3,42
30	27	63	0,54	8,2	3,48
27	24	64	0,49	7,5	3,40
24	21	65	0,44	6,9	3,26
21	18	65	0,38	6	3,25
18	15	68	0,31	5	3,30
15	12	70	0,26	4,5	3,00

По формуле (10) находим коэффициент категории режима

$$A_p = 2,0 - 0,22 \cdot 3,68 = 1,19.$$

Далее по формуле (2), используя справочный материал [9], определяем продолжительность цикла сушки:

$$\tau = 83 \cdot 1,19 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 98,7 \text{ ч.}$$

Расчет продолжительности сушки описанным ранее графоаналитическим методом дал результат 106,3 ч, т. е. относительная ошибка составила 7,2%, что значительно меньше, чем средняя ошибка стандартного табличного метода (~27,3%).

В рамках проведенной исследовательской работы были выполнены расчеты и для других типоразмеров пиломатериалов. При анализе результатов этих расчетов установлено, что погрешность при применении разработанного метода меньше, чем при применении стандартного табличного метода, в среднем в 2–2,5 раза.

Заключение. Разработан метод расчета продолжительности сушки пиломатериалов в камерах периодического действия нестандартными режимами. За основу принят табличный метод расчета. Для оценки жесткости режимов предложено использовать средневзвешенный градиент сушки. Установлена зависимость коэффициента категории режима от средневзвешенного градиента сушки. Метод расчета состоит из последовательного выполнения следующих действий:

- 1) расчет средней величины градиента сушки на каждой ступени процесса по формуле (4);
- 2) определение средневзвешенного градиента сушки с использованием формул (5) и (6);
- 3) расчет коэффициента категории режима по формуле (7);
- 4) расчет продолжительности цикла сушки табличным методом по формуле (2) с использованием известного справочного материала [7, 9–10].

Литература

1. Нормативы по камерной сушке пиломатериалов. – М., 1957. – 38 с.
2. Микит, Э. А. Интенсификация камерной сушки пиломатериалов / Э. А. Микит, К. К. Упманис. – 3-е изд. – М.: Лесная пром-сть, 1967. – 99 с.
3. Андреева, А. А. Сравнительная оценка методов расчета продолжительности камерной сушки пиломатериалов / А. А. Андреева, А. А. Преловская. // Деревообрабатывающая промышленность. – М.: Лесная пром-сть, 1970. – № 11. – С. 12–14.
4. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Госэнергоиздат, 1950. – 416 с.
5. Филоненко, Г. К. Кинетика сушильного процесса / Г. К. Филоненко. – М.: Госэнергоиздат, 1939. – 139 с.
6. Шубин, Г. С. Физические основы и расчет продолжительности сушки древесины / Г. С. Шубин. – М.: Лесная пром-сть, 1968. – 248 с.
7. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. – 140 с.
8. Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия: ГОСТ 19773-84. – Введен 01.01.85. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – С. 178–195.
9. 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.
10. Серговский, П. С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учеб. для вузов / П. С. Серговский, А. И. Рассев. – 4-е изд. – М.: Лесная пром-сть, 1987. – 360 с.