

## РОЗРАХУНОК ТРИВАЛОСТІ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ ТА ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯ В СОНЯЧНИХ СУШИЛЬНИХ КАМЕРАХ

**В.С. Козар, аспірант**

Науковий керівник – Озарків І.М. д.т.н., проф., зав. каф. БЖД НЛТУ України  
(Національний лісотехнічний університет України, м. Львів)

*Наведено методику визначення часу сушіння деревних пиломатеріалів (дощок, чорнових меблевих заготовок, паркетної фризи тощо). Даються формули для розрахунку тривалості сушіння залежно від геометрично-розмірних характеристик об'єкта сушіння та конструкції геліосушарки, призначення матеріалу.*

Відомо [1, 2], що в сонячних сушильних установках тривалість сушіння (включаючи початкове нагрівання деревини) в умовах конвективно-радіаційного (сонячного) сушіння визначається за формулою

$$\tau = \tau_{вих} \cdot A_m \cdot A_{ц} \cdot A_{в} \cdot A_{д} \cdot A_{к.я}, \quad (1)$$

де  $\tau_{вих}$  – вихідна тривалість сушіння пиломатеріалів заданої породи і розмірами від початкової вологості  $W_n$  60% до кінцевої вологості  $W_k=12\%$  в камерах із реверсивною циркуляцією, коли швидкість по матеріалу не перевищує 1 м/с (табл.1);

$A_m$  – коефіцієнт, що враховує місяць сушіння в геліоустановці;

$A_{ц}$ ,  $A_{в}$ ,  $A_{д}$ ,  $A_{к.я}$  – відповідно коефіцієнти, що враховують інтенсивність циркуляції, початкову та кінцеву вологості деревини ( $A_{в}$ ), довжину сортимента ( $A_{д}$ ) і категорію якості сушіння ( $A_{к.я}$ ).

Значення  $A_m$  вибирається в залежності від породи і місяця сушіння. Зокрема, для хвойних порід приймається в місяці травні-червні ( $A_m=3,4-2,75$ ), липні-серпні ( $A_m=2,145$ ), вересні-жовтні ( $A_m=3,4-3,82$ ); що стосується деревини модрина, то значення  $A_m$  збільшується в 4 рази, берези в 1,4 рази і дуба в 3...3,5 рази.

Коефіцієнт  $A_{к.я}$  визначається категорією якості сушіння і приймається рівним: для I к-рії  $A_{к.я}=1,20$ ; для II к-рії  $A_{к.я}=1,15$  і третьої к-рії –  $A_{к.я}=1,05$ .

Аналіз значень прямої та розсіяної радіації [1, 2] показує, що періоди максимальних надходжень протягом доби для регіонів України становитимуть для огорожень геліосушарки:

- передньої прозорої стінки орієнтованої на південь – з 8.00 до 16.00 год. (тривалість надходження – 8 год.);

- бокової стінки орієнтованої на схід – з 5.00 до 12.00 год. (тривалість надходження – 7 год.);

- стінки орієнтованої на захід – з 12.00 до 16.00 год. (тривалість надходження – 7 год.).

Враховуючи те, що в геліосушарці залежно від пори року температура сушильного агента коливається в межах  $t_c=25...55^{\circ}\text{C}$ , то для сушіння пилопродукції використовуємо тільки м'які режими сушіння.

Як показали наші дослідження тривалість сушіння хвойних пиломатеріалів (сосни, ялини товщиною 40 мм) склала в травні-червні – 10...13 днів, липні-серпні – 10...13 днів, в серпні-жовтні – 11...22 дні для досягнення кінцевої вологості  $W_k=10...12\%$ . Тривалість сушіння деревини дуба зростала в 3...3,5 рази, берези – в 1,4 рази порівняно із хвойними породами.

Виходячи із обмежень застосування геліосушарок такого типу, до конструкції камери було додатково передбачено використання електронагрівача, який давав можливість підтримувати температуру агента обробки згідно вибраного режиму сушіння (F.BRUNNER – HILDEBRAND) [4]. Нами було проведено другий етап досліджень, що дало можливість не залежати від впливу погодних факторів на тривалість процесу сушіння (похмурості неба тощо).

В такому випадку тривалість сушіння визначається за типовою методикою розрахунку калориферних камер [5].

Таблиця 1

**Вихідна тривалість сушіння  $\tau_{вих}$  (год)**

Товщина пиломатеріалів, $S_1$ , мм	Ширина пиломатеріалів, $S_2$ , мм						Товщина пиломатеріалів, $S_1$ , мм	Ширина пиломатеріалів, $S_2$ , мм					
	40-50	60-70	80-100	110-130	14-18	Більше 180 і для необрізних		40-50	60-70	80-100	110-130	14-18	Більше 180 і для необрізних
Сосна, ялина, ялиця, кедр							Модрина						
До16	23	25	26	27	27	27	До16	58	63	64	67	68	68
19	29	31	32	33	33	33	19	68	72	74	77	77	77
22	34	37	39	39	39	39	22	75	80	83	86	87	87
25	45	50	53	54	55	55	25	83	88	91	92	93	94
32	59	63	68	72	73	73	32	94	99	104	108	110	113
40	71	79	84	86	88	88	40	111	129	144	157	166	175
50	–	93	99	100	10	105	50	3	182	224	256	279	304
60	–	103	114	122	4	130	60	–	235	304	361	400	443
70	–	–	147	161	12	194	70	–	–	431	521	585	635
75	–	–	156	177	5	218	75	–	–	466	574	650	757
100	–	–	340	354	17	432		–					
					8								
					19								
					7								
					37								
					9								

Осика, липа, тополя							Береза, вільха						
До16	29	31	33	34	34	34	До16	36	37	37	38	39	39
19	36	38	39	40	40	40	19	44	45	47	47	48	48
22	43	45	47	53	54	54	22	50	51	53	54	55	55
25	59	62	64	66	67	68	25	67	73	78	81	83	84
32	73	80	84	88	89	91	32	81	85	88	91	92	94
40	81	87	93	96	99	102	40	93	96	100	101	105	107
50	–	98	109	116	11	123	50	–	115	130	141	149	158
60	–	112	128	140	9	164	60	–	155	187	213	231	249
75	–	–	253	282	15	344	75	–	–	377	420	463	514
					2								
					31								
					1								
Бук, клен, берест, в'яз							Дуб, горіх, граб						
До16	58	59	61	63	63	63	До16	84	85	86	86	87	88
19	65	68	71	73	73	74	19	88	91	94	94	96	97
22	73	77	80	81	82	83	22	97	101	104	105	106	107
25	91	94	96	99	10	102	25	11	125	132	136	138	140
32	102	109	115	118	1	122	32	7	173	193	206	214	221
40	114	126	140	152	12	167	40	14	234	269	293	307	321
50	–	170	199	225	0	255	50	6	365	431	488	520	551
60	–	250	296	339	15	396	60	18	562	679	777	841	905
75	–	–	591	657	9	805	75	3	–	108	1209	134	1483
					23			–		6		0	
					9			–					
					36			–					
					7								
					72								
					8								

Значення коефіцієнта  $A_{\mu}$  вибирається в залежності від величини добутку  $(\tau_{вих} \cdot A_0)$  і приймається за таблицею 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнта  $A_u$ 

$\tau_{вих} \cdot A_d,$ ГОД	Швидкість циркуляції, м/с		
	0,2	0,5	1,0
20	3,14	1,80	1,0
40	2,40	1,65	1,0
60	2,03	1,58	1,0
80	1,76	1,42	1,0
10	1,56	1,32	1,0
140	1,31	1,15	1,0
180	1,15	1,10	1,0
220 і більше	1,08	1,05	1,0

Таблиця 3

Значення коефіцієнта  $A_e [A_e = f(W_n)]$ 

$W_n, \%$	$W_k, \%$						
	22	20	18	16	14	12	10
120	1,071	1,12	1,18	1,25	1,33	1,43	1,55
110	1,00	1,06	1,12	1,20	1,28	1,37	1,49
100	0,94	1,00	1,06	1,14	1,22	1,31	1,43
90	0,87	0,93	1,00	1,07	1,16	1,25	1,36
80	0,80	0,86	0,93	1,00	1,09	1,18	1,29
70	0,72	0,78	0,84	0,92	1,00	1,10	1,21
65	0,67	0,74	0,80	0,87	0,96	1,05	1,16
60	0,62	0,68	0,75	0,82	0,91	1,00	1,11
55	0,57	0,63	0,69	0,77	0,85	0,94	1,06
50	0,51	0,57	0,63	0,71	0,79	0,89	1,00
45	0,44	0,50	0,57	0,64	0,73	0,82	0,93
40	0,37	0,43	0,49	0,57	0,65	0,75	0,86
35	0,29	0,35	0,43	0,49	0,57	0,66	0,78
30	0,19	0,25	0,32	0,39	0,48	0,57	0,68
28	0,15	0,21	0,27	0,35	0,43	0,53	0,64
26	0,10	0,16	0,23	0,31	0,38	0,48	0,59
24	0,06	0,11	0,18	0,27	0,33	0,43	0,54
22	–	0,06	0,13	0,22	0,28	0,38	0,49
20	–	–	0,07	0,14	0,22	0,32	0,43

Значення коефіцієнта  $A_\delta$  в залежності від відношення довжини до товщини ( $L/S_1$ )

$L/S_1$	40	35	30	25	20	15	10	7	5
$A_\delta$	1	0,97	0,95	0,93	0,91	0,88	0,80	0,70	0,60

З метою визначення співвідношення між енергією сонячного випромінювання та конвективним теплом від електронагрівача, що потрібне для сушіння пиломатеріалів, було проведено додаткові розрахунки, які наведено нижче за нашою методикою [1].

Зокрема визначимо масу вологи, що випаровується з деревини, за секунду [5, с.49]

$$M_c = \frac{m_{i\delta} \cdot \delta_{i\delta}}{3600 \cdot \tau_{cp}} \text{ кг/с}, \quad (2)$$

де  $m_{об.кам.}$  - маса вологи, яка випаровується за один камерооборот,  $кг/оборот$ .

$$m_{i\delta} \cdot \delta_{i\delta} = m_{1\delta} \cdot l_{\delta\delta} \cdot b_{\delta\delta} \cdot h_{\delta\delta} \cdot \beta_{i\delta} \text{ кг/оборот}, \quad (3)$$

де  $m_{1\delta}$  - маса вологи, яка випаровується з  $1\text{ м}^3$  деревини  $кг/м^3$ ;

$l_{шт}, b_{шт}, h_{шт}$  - відповідно довжина, ширина і висота сформованого штабеля,  $м$ ;  
 $\beta_{об}$  - коефіцієнт об'ємного заповнення штабеля, для  $l_{шт}=6,5\text{ м}$  -  $\beta=0,474$ .

$$m_{1\delta} = \rho_a \frac{W_i - W_\epsilon}{100} \text{ кг/ м}^3, \quad (4)$$

де  $\rho_a$  - базова густина,  $\rho_a=400 \text{ кг/м}^3$  для сосни  $S_1=50 \text{ мм}$ ;

$W_n, W_k$  - відповідно початкова та кінцева вологості деревини, %.

Тривалість сушіння сосни товщиною  $S_1=50\text{ мм}$ , шириною  $S_2=100\dots300\text{ мм}$  (прийmemo середню ширину  $S_2=200\text{ мм}$ ), початковою вологістю  $W_n=50\%$  і кінцевою вологістю  $W_k=11\%$  ( $W_k=10\dots12\%$  - столярно-будівельні вироби, II-га категорія якості сушіння) визначимо за формулою (1), тобто

$$\tau = 105 \cdot 2,145 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,81 \cdot 1,15 = 209,8 \text{ год.}$$

Тривалість чистого сушіння без врахування часу початкового прогрівання і кінцевої вологотеплообробки [5]

$$\tau_{ч.с.} = \tau - (\tau_{np} + \tau_{вто}) \text{ год}, \quad (5)$$

де  $\tau_{np}$  - тривалість початкового прогрівання (нагрівання) приймають для хвойних порід, коли  $t_0 > 0 \text{ }^\circ\text{C}$  1,5 год на  $1\text{ см}$  товщини (для твердолистяних порід збільшують на 50%);

$\tau_{вто}$  - тривалість вологотеплообробок, за табл. 3.2.2. [5] для сосни  $\tau_{вто}=6 \text{ год}$ .

Тоді

$$\tau_{ч.с.} = 209,8 - (1,5 \cdot 5 + 6) = 196,3 \text{ год.}$$

Таким чином, маса випаровуваної води в секунду

$$M_c = \frac{156}{3600 \cdot 209,8} = 0,00021 \text{ кг/с},$$

$$m_{1\delta} = 400 \frac{50-11}{100} = 156, \text{ кг/м}^3.$$

Розрахункова маса випаровуваної води

$$M_p = M_c \cdot k = 0,00021 \cdot 1,3 = 0,00027 \text{ кг/с}, \quad (6)$$

де  $k$  – коефіцієнт нерівномірності швидкості сушіння, який для  $W_{\kappa} \leq 12\%$  –  $k=1,30$ .

Витрати тепла на початкове прогрівання  $1 \text{ м}^3$  деревини, коли  $t_0 > 0 \text{ }^\circ\text{C}$  становитимуть

$$q_{i\ddot{a}\ddot{a}\delta l i^3} = \rho \cdot \tilde{N}_{(+)} \cdot (t_{i\ddot{a}\ddot{a}\delta} - \bar{t}_o) = 600 \cdot 2,60 \cdot (30 - 20) = 15600 \text{ кДж/м}^3, \quad (7)$$

де  $\rho$  – густина деревини (для сосни вологістю  $W=50\%$  –  $\rho=600 \text{ кг/м}^3$ );  $C_{(+)}$  – питома теплоємність деревини ( $C=f(\bar{t}_o, W)=2,6 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ ).

Витрати тепла на випаровування вологи знаходяться за формулою [5]

$$q_{\ddot{a}\ddot{e}\ddot{i}} = 1000 \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} - C_a \cdot t_{i\ddot{a}\ddot{a}\delta} \text{ кДж/кг}, \quad (8)$$

де  $I_2, I_0$  – відповідно ентальпія відпрацьованого і свіжого повітря, кДж/кг ( $I_0=46 \text{ кДж/кг}$  – влітку);

$d_2, d_0$  – вологовміст відпрацьованого і свіжого повітря, г/кг;

$C_a$  – питома теплоємність води, приймається,  $4,19 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ ;

$t_{нагр}$  – температура нагрівання деревини,  $^\circ\text{C}$ , яка приймається рівною

$$t_{нагр} = t_c + 5 \text{ }^\circ\text{C} = 30 + 5 = 35 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$q_{\ddot{a}\ddot{e}\ddot{i}} = 1000 \frac{85,67 - 46}{21,9 - 10} - 4,19 \cdot 35 = 3187 \text{ кДж/кг}.$$

Згідно розроблених нами багатоступеневих режимів сонячного сушіння температура повітря на вході в штабель коливається в діапазоні  $t_I=30 \dots 60^\circ$  [1,2].

Оскільки процес випаровування відбувається при сталій ентальпії, тобто  $I_1=I_2$ , то

$$I_1 = I \cdot t_I + 0,001 d_I (1,93 \cdot t_I + 2490) = 1 \cdot 30 + 0,001 \cdot 21,85 (1,93 \cdot 30 + 2490) = 85,67 \text{ кДж/кг} \quad (9)$$

де  $d_I$  – вологовміст повітря перед входом в штабель, г/кг,

$$d_1 = 622 \frac{D_{t_1}}{100000 - D_{t_1}} \text{ г/кг}, \quad (10)$$

де  $P_{n1}$  – парціальний тиск водяної пари при  $t_I=30^\circ\text{C}$ , тобто визначається

$$P_{n1} = \varphi_1 \cdot P_{n1} = 0,8 \cdot 4242,31 = 3393,8 \text{ Па}. \quad (11)$$

Тоді

$$d_1 = 622 \frac{3393,8}{100000 - 3393,8} = 21,85 \text{ г/кг}$$

Приведений питомий об'єм  $V_{np1}$  визначиться за виразом

$$V_{np1} = 4,62 \cdot 10^{-6} (t_I + 273) \cdot (622 + d_1) = 4,62 \cdot 10^{-6} \cdot 303 \cdot 644 = 0,90 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (12)$$

Об'єм циркулюючого агента сушіння в сонячній камері становитиме

$$V_{\ddot{u}} = \omega_{шт} \cdot F_{ж.н.шт} \cdot C \text{ м}^3/\text{с}, \quad (13)$$

де  $\omega_{шт}$  – розрахункова швидкість циркуляції агента сушіння,  $\omega_{шт} \approx 1,0 \text{ м/с}$ ;

$F_{ж.н.шт}$  – площа живого перерізу штабеля,  $\text{м}^2$ ;

$C$  – коефіцієнт використання повітряного потоку, в камері із рівномірним розподіленням агента сушіння (нагрітого повітря),  $C=1,2$ .

Для стандартного штабеля довжиною 6,5 м, шириною 1,4 м і висотою 2,0 м для геліосушарки [6] площа живого перерізу [5]

$$F_{ж.н.шт} = l_{шт} \cdot h_{шт} \cdot (1 - \beta_{\epsilon}) = 6,5 \cdot 2 \cdot (1 - 0,67) = 4,29 \text{ м}^2 \quad (14)$$

де  $\beta_6$  – коефіцієнт заповнення штабеля по висоті ( $\beta_6 = S_I / (25 + S_I) = 50 / (25 + 50) = 0,67$ ).

Тоді

$$V_u = 1,0 \cdot 4,29 \cdot 1,20 = 5,148 \approx 5,2 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Маса циркуляційного агента сушіння на 1 кг випаровуваної вологи [5]

$$m_{\delta} = \frac{V_{\delta}}{\dot{I}_{\delta} \cdot v_{i\delta,1}} = \frac{5,2}{0,00027 \cdot 0,90} = 21399,2 \text{ кг/кг}. \quad (15)$$

Тоді значення вологовмісту  $d_2$  на виході із штабеля

$$d_2 = \frac{1000}{m_u} + d_1 = \frac{1000}{21399,2} + 21,85 = 21,90 \text{ г/кг}. \quad (16)$$

Температура агента сушіння після виходу зі штабеля

$$t_2 = \frac{I_2 - 2,49 \cdot d_2}{1,0 + 0,00193 \cdot d_2} = \frac{85,67 - 2,49 \cdot 21,90}{1,0 + 0,00193 \cdot 21,90} = 29,88 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (17)$$

Затрати тепла на випаровування вологи [5], тобто сушіння становитимуть

$$Q_{\text{вип}} = q_{\text{вип}} \cdot M_p = 3187 \cdot 0,00027 = 0,86 \text{ кВт}. \quad (18)$$

**В результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки:**

1. Результати експериментальних досліджень підтверджують достовірність запропонованого нами табличного методу визначення тривалості сушіння деревних сортиментів.

2. Отримані пиломатеріали відповідають II категорії якості сушіння, що дає змогу застосовувати їх у меблевому виробництві, виготовленні корпусів музичних інструментів, столярно-будівельних виробів і паркету [3].

3. Тривалість сушіння, у порівнянні із класичними конвективними камерами, незначно зростає та може коливатись у залежності від погодних умов, що частково ускладнює промислове використання такого обладнання.

## Список літератури

1. Застосування сонячної енергії у житловому господарстві та деревообробці: Наукове видання / Озарків І.М., Мисак Й.С., Криницький Г.Т., Максимів В.М., Соколовський І.А., Копій Л.І., Озарків О.І., Козар В.С. – Львів: НВФ «Українські технології», 2012. – 338с.
2. Озарків І.М., Мисак І.С., Копинець З.П. Використання сонячної енергії в промисловості: Навч. посібник./За ред. д-ра техн. наук Озарківа І.М. – Львів: НВФ «Українські технології», 2008. – 276с.
3. Білей П.В., Соколовський І.А., Павлюст В.М., Кунинець Є.П. Керівні технічні матеріали з технології камерного сушіння пиломатеріалів. Науково-практичне видання, друге, доповнене і перероблене. – Ужгород: Карпати, 2010. – 140 с.
4. Губер Ю.М. Рекомендації з технології сушіння пиломатеріалів у конвективних сушарках. - Львів: РВВ НЛТУ України, 2003. – 28с.
5. Основи проектування сушильних цехів у деревообробній промисловості: Навч. посібник / Гербей В.М., Озарків І.М., Зарева Ю.І., Дутчак М.П., Сафаров В.О. – Львів: ОліС плюс, 1996. – 192с.

6. Декл. патент №61462 А Україна, МПК 7F26B19/00. Геліосушарка для пиломатеріалів / Озарків І.М., Білей П.В., Озарків С.І., Гуменюк Ж.Я. – №25030214; Заяв. 7.02.2003; Затв. 20.08.2003; Опубл. 17.11.2003.

#### **Аннотация**

### **РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА В СОЛНЕЧНЫХ СУШИЛЬНЫХ КАМЕРАХ**

В.С. Козар

*Приведена методика определения времени сушки древесных пиломатериалов (досок, черновых мебельных заготовок, паркетной фриззы и т.п.). Даются формулы для расчета продолжительности сушки в зависимости от геометрически-размерных характеристик объекта сушки и конструкции гелиосушарки, назначения материала.*

#### **Abstract**

### **CALCULATION OF DURATION OF WOOD AND AIR CONDITIONS DRYING IN THE SOLAR DRYING CAMERAS**

V. S. Kozar

*The method of determination of the drying time of wood lumber (boards, rough pieces of furniture, parquet friezes etc.) is presented. There are provided formulas for calculating the duration of drying depending on the geometric characteristics of the lumber, solar dryer design and the purpose of the material.*