



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.047

А.П. Капишников

Капишников Александр Петрович родился в 1948 г., окончил в 1974 г. Ленинградское высшее военное инженерно-техническое училище, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Военного инженерно-технического университета. Имеет более 60 научных трудов в области полезного использования теплоты продуктов сгорания при сжигании природного газа, жидкого и твердого топлива, древесных отходов.



ЭЛЕКТРОННАЯ ВЕРСИЯ $id\alpha$ -ДИАГРАММЫ

Перевод заложенных в $id\alpha$ -диаграмму исходных данных в форме аппроксимационных уравнений позволяет осуществить расчет процесса сушки древесины и его автоматическое управление на ЭВМ.

$id\alpha$ -диаграмма, сушка древесины, аппроксимационное уравнение, коэффициент полинома, абсолютное влагосодержание, относительная влажность, энтальпия, перегретый пар, коэффициент избытка воздуха.

Основой расчета процесса сушки пиломатериалов при использовании в качестве сушильного агента продуктов сгорания является $id\alpha$ -диаграмма [2]. Перевод заложенных в эту диаграмму исходных данных в форме аппроксимационных уравнений позволяет осуществить расчет процесса сушки древесины на ЭВМ. Наиболее важные для практического использования параметры – относительная и абсолютная влажность, температура сухого и мокрого термометров, энтальпия сушильного агента.

Относительную влажность находят по формуле

$$\varphi = P_{\text{п}} / P_{\text{нас}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{п}}$ – давление водяного пара в газовой смеси, мм рт. ст.;

$P_{\text{нас}}$ – давление насыщенного водяного пара при той же температуре, мм рт. ст.

Определение давления насыщенного пара по температуре выполняется с помощью аппроксимационного уравнения, коэффициенты которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения

Коэф- фициент полинома аргумента	Давление, бар		Удельный объем, м ³ /кг		Энтальпия, Дж/кг	
			<i>v'</i>	<i>v''</i>	<i>i'</i>	<i>i''</i>
	Численные значения коэффициента при температуре, °С					
	0...49	49...174	0...349	0...54	0...329	0...304
α_0	$5,84086 \cdot 10^{-3}$	0,14619	$1,01007 \cdot 10^{-3}$	205,628	-0,4058	2501,46
$\alpha_1 t$	$6,15310 \cdot 10^{-4}$	$-7,7993 \cdot 10^{-3}$	$-8,0823 \cdot 10^{-7}$	-13,419	4,2517	1,7802
$\alpha_2 t^2$	$-1,6705 \cdot 10^{-6}$	$2,03912 \cdot 10^{-4}$	$1,90028 \cdot 10^{-8}$	0,41364	-1,9762	$1,53709 \cdot 10^{-3}$
$\alpha_3 t^3$	$7,2321 \cdot 10^{-7}$	$-1,8842 \cdot 10^{-6}$	$-9,0887 \cdot 10^{-11}$	$-6,4663 \cdot 10^{-3}$	$2,03367 \cdot 10^{-5}$	$-2,3308 \cdot 10^{-5}$
$\alpha_4 t^4$	–	$1,49235 \cdot 10^{-8}$	$1,71037 \cdot 10^{-13}$	$4,01597 \cdot 10^{-5}$	$-7,8605 \cdot 10^{-8}$	$6,01955 \cdot 10^{-8}$
$\alpha_5 t^5$	–	–	–	–	$1,38382 \cdot 10^{-10}$	$-1,1661 \cdot 10^{-10}$

Продукты сгорания состоят из N₂, CO₂, SO₂, O₂ и водяного пара.
Объемная доля водяного пара

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \Delta\alpha + V_{H_2O}}, \quad (2)$$

где $V_{H_2O}, V_{RO_2}, V_{N_2}$ и V_{O_2} – объемы водяного пара, трехатомных газов, азота и кислорода, отнесенные к 1 кг топлива [3], м³/кг;
 α – коэффициент избытка воздуха.

При известном барометрическом давлении B давление (в мм рт. ст.) водяного пара

$$P_n = B r_{H_2O}. \quad (3)$$

Абсолютное влагосодержание (в кг/кг сухих продуктов сгорания) находят по формуле

$$d = \frac{P_i R_a T}{(B - P_i) R_i T} = \frac{R_a}{R_i} \frac{\phi D_{i\text{ан}}}{\hat{A} - \phi D_{i\text{ан}}}, \quad (4)$$

где R_i, R_n – газовая постоянная неконденсирующейся части продуктов сгорания и водяного пара, Дж/(кг·К);

T – температура продуктов сгорания, К.

Объемные доли составляющих газов продуктов сгорания

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{\sum V_i}; \quad r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{\sum V_i}; \quad r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{\sum V_i}. \quad (5)$$

Объемные доли для неконденсирующейся части продуктов сгорания

$$r'_{RO_2} = \frac{r_{RO_2}}{1 - r_{H_2O}}; \quad r'_{N_2} = \frac{r_{N_2}}{1 - r_{H_2O}}; \quad r'_{O_2} = \frac{r_{O_2}}{1 - r_{H_2O}}. \quad (6)$$

Молекулярная масса неконденсирующейся части продуктов сгорания

$$\dot{M}_0 = r'_{\text{RO}_2} \dot{M}_{\text{N}_2} + r'_{\text{N}_2} \dot{M}_{\text{N}_2} + r'_{\text{O}_2} M_{\text{O}_2}. \quad (7)$$

Мольные доли неконденсирующейся части продуктов сгорания

$$m'_{\text{RO}_2} = \frac{r'_{\text{RO}_2} M_{\text{RO}_2}}{M_0}; \quad m'_{\text{N}_2} = \frac{r'_{\text{N}_2} M_{\text{N}_2}}{M_0}; \quad m'_{\text{O}_2} = \frac{r'_{\text{O}_2} M_{\text{O}_2}}{M_0}. \quad (8)$$

Газовая постоянная неконденсирующейся части продуктов сгорания

$$R_{\bar{a}} = R_{\text{RO}_2} m'_{\text{RO}_2} + R_{\text{N}_2} m'_{\text{N}_2} + R_{\text{O}_2} m'_{\text{O}_2}. \quad (9)$$

Для насыщенного состояния водяного пара абсолютное влагосодержание максимально:

$$d_{\text{f}\bar{a}\bar{n}} = \frac{R_{\bar{a}}}{R_{\bar{i}}} \frac{D_{\text{f}\bar{a}\bar{n}}}{\hat{A} - D_{\text{f}\bar{a}\bar{n}}}. \quad (10)$$

Парциальные давления водяного пара и неконденсирующейся части продуктов сгорания связаны с абсолютным влагосодержанием и суммарным давлением следующим образом:

$$D_{\bar{i}} = \frac{\hat{A}d}{R_{\bar{a}}/R_{\bar{i}} + d}; \quad P_{\bar{a}} = \frac{(R_{\bar{a}}/R_{\bar{i}})B}{R_{\bar{a}}/R_{\bar{i}} + d}. \quad (11)$$

Энтальпия продуктов сгорания над линией насыщения $\varphi = 1$ состоит из двух частей: энтальпии составляющих неконденсирующейся части продуктов сгорания и энтальпии водяного пара в перегретом состоянии:

$$J = (c_{\text{CO}_2} m'_{\text{RO}_2} + c_{\text{N}_2} m'_{\text{N}_2} + c_{\text{O}_2} m'_{\text{O}_2})t + i_{\text{п}} d, \quad (12)$$

где $c_{\text{CO}_2}, c_{\text{N}_2}, c_{\text{O}_2}$ – удельная теплоемкость составляющих неконденсирующихся частей продуктов сгорания, Дж/(кг·К);

t – температура продуктов сгорания, °С;

$i_{\text{п}}$ – энтальпия перегретого пара, Дж/кг.

Теплофизические свойства $\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{O}_2$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Теплофизические свойства газов

Коэффициент полинома аргумента	Плотность, кг/м ³			Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)		
	Численные значения коэффициента при температуре, °С					
	0...200			0...400		
	CO ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	N ₂	O ₂
α_0	1,971	1,247	1,4219	815,104	1040,7	911,83
$\alpha_1 t$	-0,0066	-0,0039	-0,454	1,04015	-0,0549	0,22304
$\alpha_2 t^2$	$1,28 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$-7,7 \cdot 10^{-4}$	$4,573 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$

Таблица 3

Уравнения аппроксимации для энтальпии перегретого водяного пара

Коэффициент полинома аргументов	Температура, °С			
	6...550	32...550	45...550	65...550
	Численные значения коэффициента при давлении, бар			
	0,01...0,05	0,05...0,10	0,10...0,22	0,22...0,30
α_0	2478,663	5125,652	3501,268	891,9587
$\alpha_1 t^{0,05}$	164,993	-1645,44	-2899,77	658,7162
$\alpha_2 P^{0,05}$	755,7046	2131,611	4274,484	587,8756
$\alpha_3 t^{0,1}$	-1023,55	-4878,62	-5791,06	420,3514
$\alpha_4 P^{0,1}$	-129,834	260,3582	3491,823	350,1599
$\alpha_5 t^{0,25}$	637,8403	3117,868	3632,211	-183,343
$\alpha_6 P^{0,25}$	-467,955	-1402,36	-1653,27	-67,7658
$\alpha_7 t^{0,5}$	-195,962	-693,606	-715,124	-46,5424
$\alpha_8 P^{0,5}$	240,033	65,9956	-4333,81	-206,48
$\alpha_9 t^{0,75}$	47,51309	122,6628	113,9487	27,31837
$\alpha_{10} P^{0,75}$	202,3436	735,8717	717,7958	-96,6957
$\alpha_{11} t$	-3,85055	-9,40339	4986,685	-2,58352
$\alpha_{12} P$	-109,564	387,8449	-7,94838	29,79141
$\alpha_{13} t P$	0,031953	0,031275	0,026805	0,024273
$\alpha_{14} t^{1,5}$	0,049928	0,067185	0,058266	0,047754
$\alpha_{15} P^{1,5}$	-349,177	-984,985	-3056,46	111,7455

Таблица 4

Уравнения аппроксимации для удельного объема перегретого водяного пара

Коэффициент полинома аргументов	Температура, °С			
	6...550	17...550	24...550	28...550
	Численные значения коэффициента при давлении, бар			
	0,01...0,02	0,02...0,03	0,03...0,04	0,04...0,05
α_0	375,6264	301,9078	92,03947	70,58119
$\alpha_1 t^{0,05}$	180,4417	-51,8131	58,68347	41,60556
$\alpha_2 P^{0,05}$	-51,3279	97,34527	10,82114	16,02202
$\alpha_3 t^{0,1}$	98,68788	-209,539	27,61258	14,88621
$\alpha_4 P^{0,1}$	-286,154	-46,5787	-47,5039	-24,202
$\alpha_5 t^{0,25}$	-126,030	141,324	-34,9707	-36,538
$\alpha_6 P^{0,25}$	-537,663	-245,956	-131,239	-86,7079
$\alpha_7 t^{0,5}$	37,74881	35,65	9,3343	14,96928
$\alpha_8 P^{0,5}$	-400,179	-242,069	-130,378	-94,7023
$\alpha_9 t^{0,75}$	-8,26081	6,981674	-1,80798	-3,85311
$\alpha_{10} P^{0,75}$	-163,241	-153,32	-88,1803	-68,7853
$\alpha_{11} t$	1,591258	-0,30811	0,442825	0,668866
$\alpha_{12} P$	140,9083	-83,5191	-51,8304	-43,2059
$\alpha_{13} t P$	-23,0788	-7,69277	-3,84807	-2,3061
$\alpha_{14} t^{1,5}$	-0,0074	0,004866	-0,00111	-0,00417
$\alpha_{15} P^{1,5}$	1224,289	-20,3287	-14,8048	-14,0529
$\alpha_{16} t^{1,5} P^{1,5}$	0,000648	0,000131	0,000346	-0,00018
$\alpha_{17} t^2$	$5,19 \cdot 10^{-5}$	$-3,00 \cdot 10^{-5}$	$6,08 \cdot 10^{-6}$	$3,04 \cdot 10^{-5}$
$\alpha_{18} P^2$	-44,4741	-4,25419	-3,61575	-3,9279

Энтальпию и удельный объем перегретого водяного пара вычисляют по уравнениям $i_{\text{п}} = \int (t, P_{\text{п}})$ и $v_{\text{п}} = \int (t, P_{\text{п}})$, коэффициенты полиномов которых приведены в табл. 3, 4. Аппроксимация выполнена по данным [1, 4].

$I d\alpha$ -диаграмма не рассматривает парогазовую смесь при переходе водяного пара во влажное состояние. В этом случае влажный пар включает сухой насыщенный пар и воду. Он характеризуется степенью сухости:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\dot{I}_{\text{г}}}{\dot{I}_{\text{г}} + \dot{I}_{\text{а}}}, \quad (13)$$

где $M_{\text{п}}$ и $M_{\text{в}}$ – масса пара и воды, кг.

Абсолютное влагосодержание находят по зависимости, которая аналогична (4):

$$d = \frac{R_{\text{а}}}{R_{\text{г}}} \frac{\tilde{\sigma} D_{\text{га}}}{\tilde{\sigma} D_{\text{га}} - \tilde{\sigma} D_{\text{га}}}. \quad (14)$$

Продукты сгорания ниже линии насыщения становятся двухфазной средой, которая состоит из газов и капель влаги.

Для области влажного пара энтальпию и удельный объем определяют по следующим уравнениям:

$$i_x = i'(1 - x) + i''x; \quad (15)$$

$$v_x = v'(1 - x) + v''x, \quad (16)$$

где i' , v' и i'' , v'' – энтальпия и удельный объем соответственно кипящей жидкости и сухого насыщенного пара.

Программа расчета, выполненная на ЭВМ, позволяет определять изменения тепловлажностного состояния двухфазного потока многокомпонентной смеси продуктов сгорания. При этом возможен учет колебания величины суммарного давления смеси, коэффициента избытка воздуха и объемных долей составляющих продуктов сгорания в процессе сушки пиломатериалов. Это создает предпосылки для использования микропроцессорной техники при управлении сушкой древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 408 с.
2. Серговский П.С. Гидродинамическая обработка и консервирование древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1975. – 400 с.
3. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. – М.: Энергия, 1973. – 295 с.
4. Урушев М.В. Теплофизические свойства рабочих тел, теплоносителей и материалов. – Л.: ЛВВИСКУ, 1976. – 147 с.

Военный инженерно-технический университет

Поступила 5.09.01

A.P. Kapishnikov

Electronic Version of $id\alpha$ -Diagram

Transfer of the initial data laid in $id\alpha$ -diagram in the form of approximated equations allows realizing the computation of wood drying process and its automatic control on computer.
