



Ю.И. Тракало
О.В. Кузнецова

ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА И СУШКА ДРЕВЕСИНЫ

Екатеринбург
2015

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инновационных технологий и оборудования деревообработки

Ю.И. Тракало
О.В. Кузнецова

ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА И СУШКА ДРЕВЕСИНЫ

**Свойства обрабатывающих агентов:
влажный воздух, топочные газы**

Учебно-методическое пособие
по практическим занятиям
для студентов очной и заочной форм обучения.
Направление «Технология лесозаготовительных
и деревоперерабатывающих производств»

Екатеринбург
2015

Печатается по рекомендации методической комиссии ИЛБиДС.
Протокол № 2 от 09 октября 2014 г.

Рецензент – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой МОД Чернышев О.Н.

Редактор Л.Д. Черных
Оператор компьютерной верстки Т.В. Упова

Подписано в печать 15.05.2015			Поз. 17
Плоская печать	Формат 60x84	1/16	Тираж 10 экз.
Заказ	Печ.л. 1,63		Цена руб. коп.

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

1. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

1.1. Свойства влажного воздуха

Для тепловой обработки и сушки древесины очень часто используют атмосферный воздух. В воздухе всегда присутствует какое-то количество влаги в виде водяного пара. Смесь сухого воздуха с водяным паром принято называть *влажным воздухом*. При давлении, близком к атмосферному, сухой воздух и содержащийся в нем пар с точностью, достаточной для технических расчетов, можно рассматривать как идеальные газы, подчиняющиеся уравнению Менделеева-Клапейрона.

$$PV = RT, \quad (1)$$

где P – давление, Па;

V – объем, м³;

T – температура, К;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/кг·К (газовая постоянная сухого воздуха равна $R_g = 287,14$ Дж/кг·К).

Важным параметром, характеризующим состояние влажного воздуха, является парциальное давление водяного пара. *Парциальное давление* компонента в смеси газов – это давление, которое имел бы данный компонент при удалении из объема, занимаемого смесью, всех остальных газов. В соответствии с законом Дальтона, давление влажного воздуха определяется:

$$P = P_g + P_n, \quad (2)$$

где P_g – парциальное давление сухого воздуха, Па;

P_n – парциальное давление водяного пара, Па.

Другие параметры влажного воздуха: абсолютная влажность, относительная влажность, влагосодержание, теплосодержание, температура.

Абсолютная влажность (q_n) – масса водяного пара, содержащегося в единице объема влажного воздуха.

$$q_n = \frac{1}{V_n}, \quad (3)$$

где V_n – объем пара в воздухе, м³.

Воздух, способный поглощать водяные пары, называется *ненасыщенным*; воздух, не способный поглощать водяной пар, называется *насыщенным*. Абсолютная влажность насыщенного паром воздуха называется *влагоемкостью* (q_n).

Относительная влажность воздуха φ – это отношение абсолютной влажности к его влагоемкости при данной температуре. Величину относительной влажности выражают либо в %, либо она безразмерная. Для сухого воздуха $\varphi = 0\%$, для воздуха, насыщенного водяным паром, $\varphi = 100\%$.

$$\varphi = \frac{q_n}{q_n} = \frac{P_n}{P_n}, \quad (4)$$

где P_n – парциальное давление водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, Па;

P_n – давление насыщения водяного пара при той же температуре, Па, (прил. 1).

Влажосодержание d (в г/кг) – это отношение массы пара (в граммах), содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха (в килограммах).

$$d = 1000 \frac{M_n}{M} = 1000 \frac{\rho_n}{\rho_e}, \quad (5)$$

где M – масса сухого воздуха, кг;

ρ_e – плотность сухого воздуха, кг/м³.

Для влажного воздуха, находящегося под атмосферным давлением, влажосодержание, г/кг, равно:

$$d = \frac{622 P_n}{P_a - P_n}, \quad (6)$$

где P_a – атмосферное давление; $P_a = 10^5$ Па.

Теплосодержание влажного воздуха I (в кДж/кг) – это полное количество тепла, содержащаяся в 1 кг смеси воздуха и пара, включая скрытую теплоту парообразования.

$$I = 1,01t + 0,001d(1,88t + 2500), \quad (7)$$

где t – температура влажного воздуха, °С; ($0 \leq t \leq 120$ °С).

С помощью формул 1-7 можно определить параметры влажного воздуха расчетным путем, графически, пользуясь Id -диаграммой (прил. 2).

Каждой точке на Id -диаграмме соответствует определенное состояние влажного воздуха (рис. 1). Чтобы найти нужную точку, надо знать, как минимум, два параметра воздуха, после чего остальные параметры легко определяются.

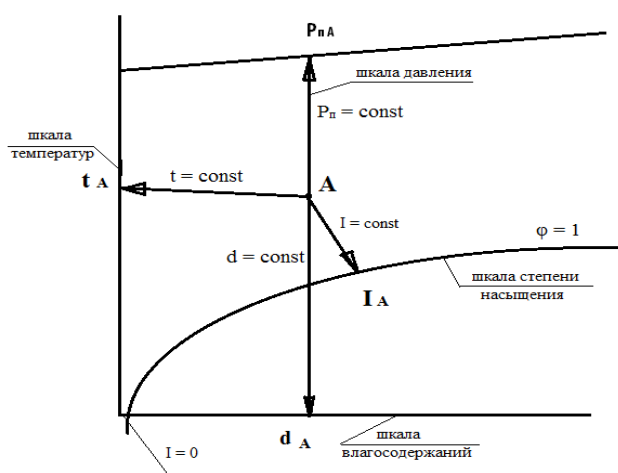


Рис. 1. Схема определения параметров влажного воздуха на Id -диаграмме

1.2. Процессы изменения состояния воздуха

Нагревание или *охлаждение* воздуха при контакте с горячей или холодной сухой поверхностью происходит без изменения его влагосодержания d . Остается постоянным и парциальное давление водяного пара. При нагревании температура и теплосодержание воздуха возрастают, а относительная влажность и плотность уменьшаются. Охлаждение воздуха сопровождается обратным изменением этих параметров. На Id -диаграмме процессы нагревания и охлаждения воздуха отображаются линиями $d = \text{const}$. На рис. 2 отрезок 1 - 2 показывает процесс нагревания воздуха от состояния 1 до состояния 2, а отрезок 1 - 3 – охлаждение исходного воздуха до состояния 3. Если продолжать охлаждение, то он может достичь состояния насыщения ($\varphi = 1$), которому на рис. 2 соответствует точка 4. Температура, при которой это произойдет, называется *температурой точки росы* t_p .

Дальнейшее охлаждение воздуха, насыщенного паром, будет сопровождаться конденсацией из него воды, что приводит к уменьшению влагосодержания при постоянном значении относительной влажности $\varphi = 1 = \text{const}$ (отрезок 4 – 5). Отсюда, количество конденсата равно $(d_4 - d_5)$, грамм.

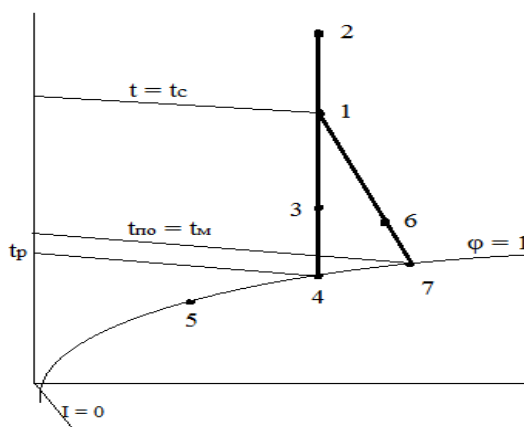


Рис. 2. Процессы нагревания, охлаждения и испарения воды на Id -диаграмме

Испарение влаги в воздух происходит, если он не насыщен паром и контактирует с поверхностью воды или влажного тела. $I = \text{const}$, так как энергия, затрачиваемая на испарение, остается в воздухе в виде скрытой теплоты парообразования. Происходящее изменение состояния воздуха изображается на Id -диаграмме (рис. 2) отрезком 1- 6 прямой линии $I = \text{const}$. Температура воздуха при испарении воды понижается, а влагосодержание, относительная влажность и плотность возрастают. Если процесс испарения воды в воздух продолжается достаточно долго, то воздух становится *насыщенным водяным паром*. Температура, при которой воздух, испаряя влагу, достигает состояния насыщения, называется *температурой предела охлаждения* t_{no} . Температура предела охлаждения измеряется психромет-

ром. По показаниям сухого ($t_c = t$) и смоченного ($t_m = t_{no}$) термометров психрометра, используя Id -диаграмму, легко определить все параметры воздуха. Для этого находят точку пересечения шкалы теплосодержания $t_m = \text{const}$ с линией $\varphi = 1$ (точка 7 на рис. 2). От этой точки проводят линию $I = \text{const}$ до ее пересечения со шкалой теплосодержания $t_c = \text{const}$. Полученная при этом точка 1 и будет характеризовать искомое состояние воздуха.

Процесс смешения воздуха в Id -диаграмме изображается прямой, соединяющей точки, соответствующие состоянию смешиваемых масс воздуха. Точка смеси всегда располагается на этой прямой и делит ее на отрезки, длины которых обратно пропорциональны смешиваемым количествам воздуха.

Если смешивать воздух состояния в точке 0 (рис. 3) в количестве G с воздухом состояния 2 в количестве nG , то точка смеси 1 разделит отрезок 0-2 на части 1-2, 0-1, отношение длин которых равно:

$$n = \frac{G_2}{G_0} . \quad (8)$$

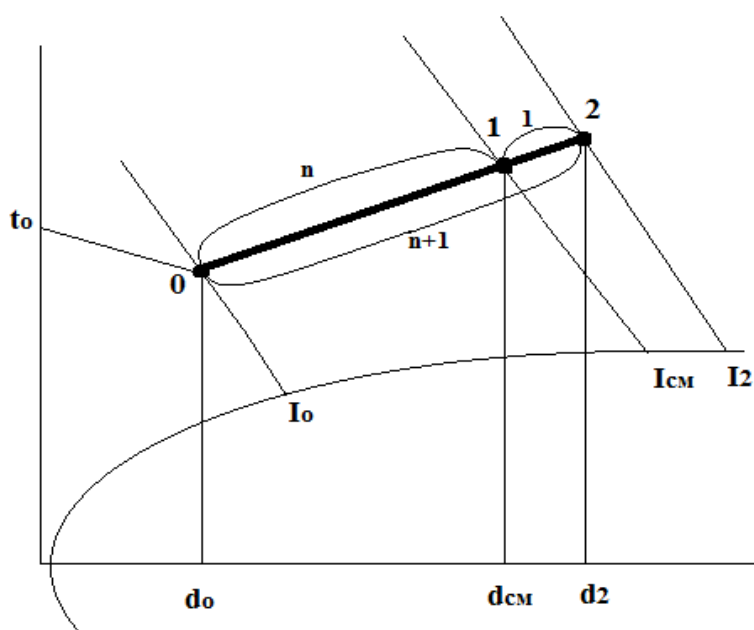


Рис. 3. Процесс смешения воздуха на Id -диаграмме

Таким образом, чтобы найти точку смеси, нужно отрезок 0 - 2 или его проекции разделить на $n+1$ часть и отложить от точки 2 одну часть, оставив n частей до точки 0. Такое построение определит положение точки смеси 1 (рис. 3). Точка 1, характеризующая состояние смеси, всегда находится на прямой, соединяющей точки 0 и 2, которые соответствуют состоянию смешиваемых компонентов. При этом она располагается ближе к точке, характеризующей преобладающего в смеси компонента.

Уравнение теплового баланса будет выглядеть так:

$$I_o \cdot l + I_2 \cdot n = I_{см} (n + l) , \quad (9)$$

$$n = \frac{I_2 - I_{см}}{d_2 - d_{см}} = \frac{I_{см} - I_o}{d_{см} - d_o} . \quad (10)$$

Возможен случай, когда точка смеси окажется в области ниже линии $\varphi = 1$. Это значит, что при смешении будет образовываться туман (конденсация в мелкие капли водяных паров, содержащихся в воздухе). Если принять, что температура выпадающей влаги близка к температуре мокрого термометра, которой соответствует ($I_l = \text{const}$) точка смеси l' (рис. 4), то действительные параметры точки смеси l будут соответствовать пересечению линий $I_l = \text{const}$ и $\varphi = 1$.

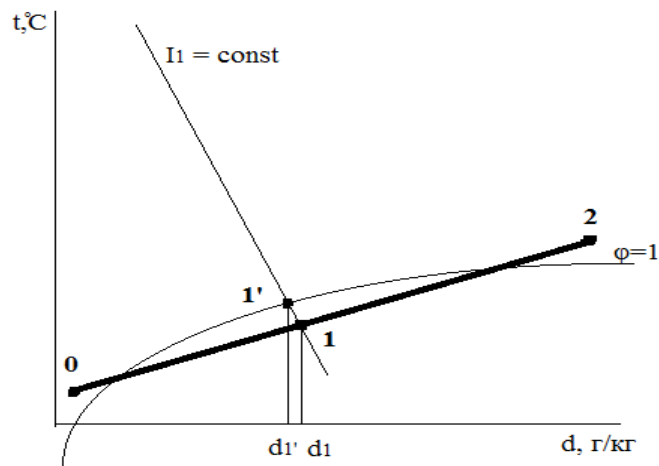


Рис. 4. Процесс смешения воздуха при расположении точки смеси ниже линии $\varphi = 1$ на Id -диаграмме

Количество выпавшей из 1 кг воздуха влаги будет равно $(d_1 - d_1')$.

При *процессе смешения воздуха нескольких состояний* точка смеси находится путем последнего графического построения процессов смешения (рис. 5).

$$G_o : G_1 : G_2 = 1 : n : m . \quad (11)$$

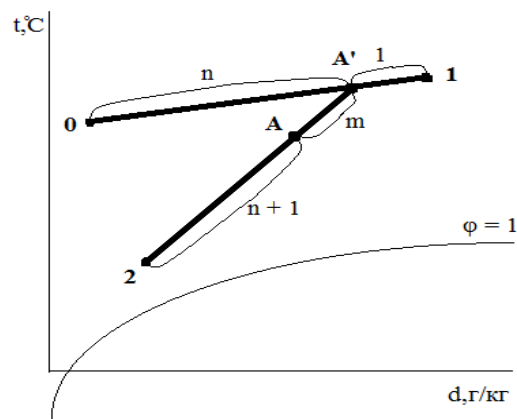


Рис. 5. Процесс смешения воздуха нескольких состояний на Id -диаграмме

Задание 1. Определить расчетным путем неизвестные параметры

влажного воздуха (табл. 1): теплосодержание I , влагосодержание d , температура t , парциальное давление пара P , степень насыщения водяного пара φ : φ_0 до и φ_1 после процесса нагревания.

При решении задачи необходимо использовать таблицу зависимости давления насыщения водяного пара от температуры, приведенную в прил. 1.

Таблица 1

№ задачи	I_0 , кДж/кг	d_0 , г/кг с.в.	$P_{\text{но}}$, Па	t_0 , °C	φ_0	Нагревание до	
						t_1 , °C	φ_1
1	1300	-	-	80	-	98	-
2	-	-	25000	67	-	108	-
3	-	205	-	-	0,85	-	0,28
4	-	-	-	53	0,75	104	-
5	-	170	-	-	0,90	112	-
6	-	-	-	57	0,25	100	-
7	-	205	-	-	0,80	-	0,35
8	500	-	-	65	-	102	-
9	610	-	-	70	-	92	-
10	-	470	-	-	0,90	-	0,10
11	1020	-	-	75	-	102	-
12	-	135	-	-	0,80	115	-
13	-	200	-	-	0,75	-	0,15
14	400	-	-	60	-	105	-
15	-	-	-	100	0,70	125	-
16	-	58	-	48	-	105	-
17	290	-	-	55	-	110	-
18	205	-	-	45	0,30	125	-
19	-	-	-	99	0,30	125	-
20	-	-	-	54	0,90	119	-
21	490	165	-	-	0,80	103	-
22	770	-	30500	-	0,75	103	-
23	905	-	-	72	-	109	-
24	480	-	-	61	-	117	-
25	580	185	-	-	1,00	98	-
26	500	190	-	-	-	118	-
27	895	-	-	70	-	115	-
28	-	205	-	-	0,85	-	0,25
29	-	293	-	-	0,90	112	-
30	415	-	-	62	0,95	117	-
31	-	-	19000	-	0,90	111	-
32	-	140	-	70	-	115	-
33	-	-	26000	69	-	103	-
34	500	-	20500	-	-	113	-
35	1220	430	-	-	0,70	122	-
36	-	210	-	-	0,95	-	0,20
37	-	52	-	42	-	79	-
38	-	-	-	50	0,90	113	-

Определить параметры влажного воздуха до и после процесса нагревания с помощью *Id*-диаграммы (прил. 2). Результаты ввести в табл. 2.

Таблица 2

Способ определения параметра	P_{no} , Па	d_n , г/кг с.в.	φ_0	φ_1	I_1 , кДж/кг
Расчетным путем					
Графическим путем					

Задание 2. Определить расчетным путем по двум заданным параметрам (табл. 3) неизвестные параметры влажного воздуха двух состояний, а также параметры смеси, если известно соотношение масс "n" смешиваемых компонентов, т.е. коэффициентов рециркуляции.

Таблица 3

№ задачи	Параметры первого компонента					Параметры второго компонента					Коэффициент
	I_1 , кДж/кг	d_1 , г/кг с.в.	t_1 , °C	P_1 , Па	φ_1	I_2 , кДж/кг	d_2 , г/кг с.в.	t_2 , °C	P_2 , Па	φ_2	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	500	-	81	-	-	-	-	97	-	0,45	2
2	-	-	30	2500	-	-	450	-	-	0,20	3
3	-	-	35	2400	-	-	375	-	-	0,25	4
4	-	-	40	5000	-	-	350	-	-	0,30	5
5	-	-	43	-	0,2	1140	390	-	-	-	6
6	-	-	47	-	0,45	-	385	122	-	-	35
7	160	-	74	-	-	-	275	74	-	-	25
8	145	-	45	-	-	1220	-	105	-	-	10
9	-	-	-	1000	0,70	-	460	109	-	-	5
10	120	-	80	-	-	1320	460	-	-	-	7
11	-	20	63	-	-	1280	-	82	-	-	8
12	140	-	71	-	-	1080	-	-	37200	-	15
13	-	20	100	-	-	1340	-	-	43000	-	11
14	40	20	25	-	-	1050	-	55	-	-	9
15	180	-	58	-	-	-	330	102	-	-	12
16	104	-	65	-	-	-	427	-	-	0,70	13
17	124	-	81	-	-	-	317	-	-	0,75	17
18	144	-	93	-	-	-	-	75	-	0,75	10
19	-	-	120	39000	-	-	-	40	-	0,50	13
20	-	-	-	42000	0,70	190	-	105	-	-	5
21	-	-	82	11000	-	-	-	100	-	0,40	12

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
22	115	-	49	-	-	-	-	99	-	0,38	6
23	213	-	63	-	-	-	-	94	-	0,41	11
24	-	-	34	2400	-	-	430	-	-	0,25	4
25	165	-	70	-	-	-	255	70	-	-	9
26	155	-	49	-	-	1120	-	101	-	-	8
27	-	-	45	-	0,18	1080	375	-	-	-	7
28	-	-	-	12000	0,75	-	430	104	-	-	14
29	130	-	75	-	-	1300	445	-	-	-	13
30	-	25	64	-	-	1240	-	80	-	-	15
31	160	-	73	-	-	1060	-	-	37000	-	16
32	-	30	66	-	-	1220	-	76	-	-	12
33	135	-	78	-	-	1290	440	-	-	-	11
34	-	-	-	13000	0,78	-	435	105	-	-	10
35	165	-	51	-	-	1125	-	91	-	-	9
36	175	-	72	-	-	265	-	72	-	-	8
37	-	-	41	-	0,40	-	315	102	-	-	18
38	-	-	45	-	0,24	1040	355	-	-	-	17

Задание 3. По данным табл. 4 найти на Id -диаграмме точку 0 , характеризующую состояние влажного воздуха, определить остальные параметры для нее, построить процесс охлаждения до указанной в табл. 4 температуры. Определить графически параметры охлаждения воздуха (теплосодержание I_2 , влагосодержание d_2 , парциальное давление водяного пара, степень насыщения водяного пара φ_2 , температуру «мокрого» термометра $t_{мз}$ и температуру точки росы t_{pz}).

Если процесс охлаждения сопровождается выпадением конденсата, то определить его количество, приходящееся на один килограмм сухого воздуха.

Таблица 4

№ задачи	Параметры влажного воздуха до охлаждения					Темп. возд. после охлажд.
	$I_0, \text{кДж/кг}$	$d_0, \text{г/кг с.в}$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$P_0, \text{Па}$	φ_0	$t_2, ^\circ\text{C}$
1	2	3	4	5	6	7
1	-	-	118	41000	-	45
2	-	290	-	-	0,37	28
3	-	120	-	-	0,28	44
4	-	-	-	28000	0,35	36
5	-	-	122	25000	-	43
6	-	-	-	29000	0,35	36

Окончание табл. 4

7	-	-	102	-	0,25	49
8	-	-	95	-	0,35	80
9	-	-	-	35000	0,30	32
10	-	-	116	-	0,15	71
11	-	-	120	42000	-	50
12	-	320	-	-	0,30	35
13	-	210	-	-	0,35	25
14	-	-	-	27000	0,40	60
15	-	-	108	-	0,15	72
16	-	-	100	-	0,10	31
17	-	-	120	30000	-	38
18	-	390	-	-	0,20	43
19	-	100	-	-	0,25	50
20	-	35	118	-	-	32
21	720	-	114	-	-	44
22	-	-	100	-	0,30	78
23	-	-	114	-	0,20	90
24	700	-	115	-	-	47
25	-	35	120	-	-	80
26	-	100	-	-	0,20	55
27	-	-	-	29000	0,20	78
28	1200	-	100	-	-	90
29	-	30	125	-	-	44
30	-	-	101	-	0,12	81

Задание 4. По исходным данным одного из вариантов табл. 5 дать характеристику влажного воздуха, полученного в результате смешения воздуха трех компонентов (то есть найти I – теплосодержание, d – влаго-содержание, t_m, t_c – температуру «мокрого» и «сухого» термометров, t_p точку росы, P – парциальное давление, ϕ – степень насыщения водяного пара). По условиям задачи построить графики процессов смешения на Id -диаграмме.

Таблица 5

№ задачи	Параметры первого компонента		Параметры второго компонента		Параметры третьего компонента		Количество смешивающих компонентов, кг		
	I_1 , кДж/кг	t_1 , °C	t_{c2} , °C	t_{m2} , °C	d_3 , г/кг с.в	t_{c3} , °C	G_1	G_2	G_3
<i>l</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	220	50	110	60	350	100	12	4	1
2	1000	80	50	40	200	120	14	3	1
3	700	96	70	46	400	80	11	4	1

Окончание табл. 5

<i>l</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	260	52	108	68	410	124	1	4	8
5	310	61	52	30	420	80	16	8	1
6	420	60	72	28	430	122	1	3	12
7	320	120	106	70	440	82	8	4	1
8	240	110	54	28	450	120	4	8	1
9	430	82	74	70	460	84	1	3	9
10	330	72	104	72	470	118	14	7	1
11	250	54	76	70	480	86	1	3	5
12	380	99	56	56	490	116	15	3	1
13	440	120	102	74	500	84	2	6	9
14	260	108	78	70	390	118	7	1	3
15	350	79	58	28	395	82	4	3	9
16	450	70	100	68	380	116	10	4	1
17	270	118	68	60	385	80	11	3	1
18	390	100	48	26	370	114	1	4	9
19	460	80	98	66	375	78	7	3	1
20	360	66	70	60	360	112	1	7	15
21	280	101	100	64	365	76	3	6	1
22	230	51	120	69	500	80	4	10	1
23	280	122	90	69	490	82	3	1	6
24	235	52	119	68	480	84	10	1	4
25	275	120	91	68	470	86	1	3	6
26	315	58	118	67	460	88	4	3	1
27	270	118	92	67	450	87	1	3	4
28	265	61	117	66	440	85	1	4	3
29	260	116	93	66	430	83	4	10	2
30	255	114	116	65	420	84	7	2	1

Задание 5. По известным данным одного из вариантов задач табл. 6 определить параметры влажного воздуха (I – теплосодержание, d – влагосодержание, P – парциальное давление, φ – степень насыщения водяного пара, t_m, t_c – температура по «мокрому», «сухому» термометрам, t_p – температура точки росы), полученного в результате смещения двух компонентов, если известно, что этот воздух участвовал в дальнейшем процессе, указанном в каждом варианте задачи (см. колонку 6 табл. 6).

Таблица 6

№ задачи	Параметры первого компонента		Параметры второго компонента		Процесс, в котором участвует смесь двух компонентов	Параметры смеси после процесса	
	d_1 , г/кг с.в	t_{c1} , °C	t_{c2} , °C	t_{m2} , °C		t_{c4} , °C	φ_4
1	122	100	100	74	Охлаждение	80	0,50
2	130	98	120	73	Испарение	70	0,60
3	135	99	112	72	Испарение	74	0,670
4	140	97	115	74	Охлаждение	68	0,80
5	150	96	119	73	Испарение	72	0,90
6	145	95	117	72	Охлаждение	80	0,55
7	155	94	115	70	Испарение	80	0,60
8	160	93	114	69	Охлаждение	78	0,60
9	50	42	80	74	Нагревание	110	0,15
10	45	44	82	72	Нагревание	108	0,14
11	55	50	81	71	Нагревание	110	0,16
12	40	40	84	70	Нагревание	100	0,20
13	60	55	83	71	Нагревание	98	0,21
14	35	40	86	74	Нагревание	99	0,22
15	65	54	85	73	Нагревание	97	0,21
16	30	35	88	72	Нагревание	90	0,30
17	70	52	87	71	Нагревание	92	0,28
18	25	40	120	72	Охлаждение	72	0,70
19	75	56	82	69	Нагревание	110	0,16
20	20	30	118	72	Испарение	72	0,75
21	80	54	117	71	Испарение	71	0,70
22	15	28	116	70	Охлаждение	80	0,60
23	85	56	115	69	Испарение	69	0,70
24	10	30	114	70	Охлаждение	70	0,70
25	90	60	113	71	Испарение	71	0,90

1.3. Процессы изменения состояния сушильного агента в конвективных сушилках

1.3.1. Воздушные сушки с однократной циркуляцией (рис. 6).

Согласно этой схеме, атмосферный воздух состояния 0 поступает в калорифер. Здесь он нагревается, приобретая состояние 1 . Нагретый воздух вступает в контакт с высушиваемым материалом и, испаряя из него влагу, вновь изменяет свои параметры. Отработавший воздух в состоянии 2 полностью удаляется в атмосферу. Для сушки пиломатериалов сушки с однократной циркуляцией не применяются, они могут быть применены в некоторых случаях для сушки измельченной древесины.

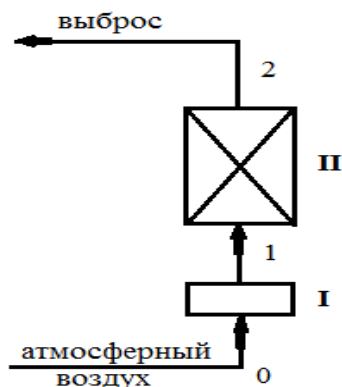


Рис. 6. Принципиальная схема воздушных сушилок с однократной циркуляцией: I – калорифер; II – высушиваемый материал

В сушилке с однократной циркуляцией (рис. 7) процесс нагревания атмосферного воздуха в калорифере изображается отрезком $0 - 1$, расположенным на линии $d = \text{const}$. При сушке, то есть при испарении влаги из материала, состояние воздуха изменяется по линии постоянной энтальпии $1 - 2$.

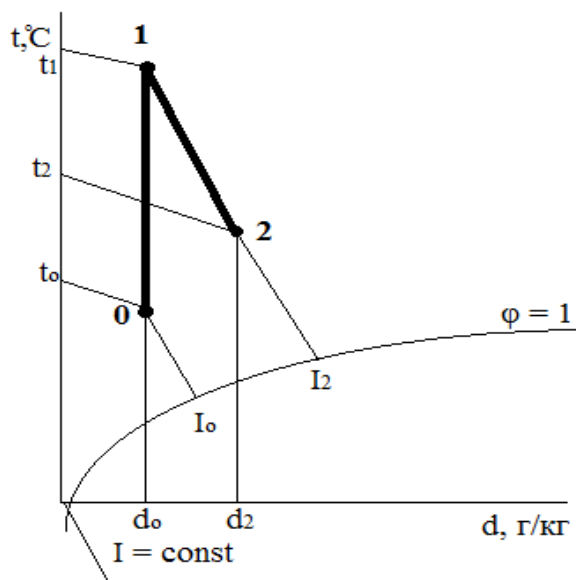


Рис. 7. Изображение на Id -диаграмме процессов изменения состояния воздуха в сушилках с однократной циркуляцией

1 кг свежего воздуха испарит $(d_2 - d_0)$, г/кг, (рис. 7). Расход свежего воздуха l_0 (**кг св.в./кг испар. влаги**)

$$l_0 = \frac{1000}{d_2 - d_0}. \quad (12)$$

Для нагрева 1 кг свежего воздуха требуется $(I_2 - I_0)$, кДж, (рис. 7). Количество тепла q на 1 кг испаряемой влаги, **кДж/кг испар. влаги**, равно

$$q = l_0(I_2 - I_0) = \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} \cdot 1000. \quad (13)$$

2. Воздушные сушилки с многократной циркуляцией

В сушилке с многократной циркуляцией (рис. 8) выбрасывается небольшая часть отработанного воздуха 2, остальной агент сушки 2 идет на рециркуляцию и смешивается со свежим воздухом 0.

$$n = \frac{G_2}{G_0}, \quad (14)$$

где n – коэффициент прибавления рециркуляции воздуха.

В результате смешения свежего воздуха и рециркулированного воздуха получаем смесь 3, которая направляется калорифером и нагревается до строго заданных режимных параметров.

Процесс испарения 1 – 2 в сушилке с многократной циркуляцией идет по треугольнику 1-2-3 (рис. 9), который называется *треугольником сушики*.

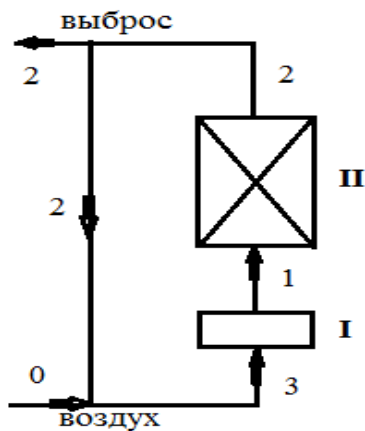


Рис. 8. Принципиальная схема воздушных сушилок с многократной циркуляцией: I – калорифер; II – высушиваемый материал

При изменении состояния свежего воздуха в процессе смешения всегда можно подобрать соотношение массовых частей таким образом, чтобы точка смеси 3 лежала на линии влагосодержания d_1 . Получаются параметры на входе высушиваемого материала строго заданного режима. По линии теплосодержания дойти до $\phi = 1$ и определить температуру мокрого термометра (рис. 9).

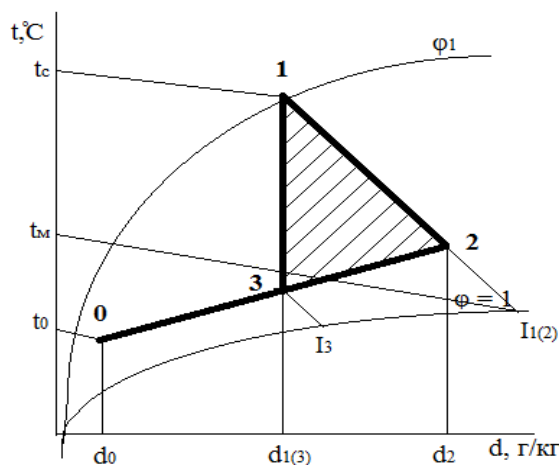


Рис. 9. Изображение на Id -диаграмме процессов изменения состояния воздуха в сушилках с многократной циркуляцией

Расход свежего воздуха l_0 (**кг св. воздуха/кг испар. влаги**)

$$l_0 = \frac{1000}{d_2 - d_0} \quad (15)$$

Расход циркулирующего по материалу агента сушки l_u (**в кг цир. в./кг исп. влаги**)

$$l_u = \frac{1000}{d_2 - d_{1(3)}} \quad (16)$$

Расход тепла на 1 кг испаряемой влаги в сушильной установке с многократной циркуляцией q (**в кДж/кг исп. вл**)

$$q = \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} 1000 - 4,19t_m \quad (17)$$

Задание 6. Определить l_0 – расход свежего воздуха и q тепла на 1 кг испаряемой влаги в сушильной установке с однократной циркуляцией агента сушки по материалу, если известны параметры свежего воздуха, агента сушки и отработавшего агента сушки (см. табл. 7).

Построить графики процессов сушильного цикла на Id -диаграмме.

Таблица 7

№ задачи	Параметры свежего воздуха		Температура агента сушки	Параметр отработавшего агента сушки
	$t_0, ^\circ\text{C}$	φ_0		
1	51	0,15	101	0,96
2	54	0,20	104	0,95
3	56	0,35	109	0,80
4	55	0,40	115	0,85
5	57	0,55	114	0,70
6	58	0,60	108	0,75
7	59	0,75	120	0,60
8	60	0,80	120	0,65
9	56	0,95	119	0,70
10	55	0,80	114	0,75
11	54	0,70	117	0,80
12	53	0,90	98	0,85
13	52	0,85	109	0,90
14	62	0,50	113	0,95
15	64	0,55	114	1,00
16	65	0,20	113	0,80
17	66	0,25	112	0,85
18	64	0,30	111	0,90
19	63	0,35	110	0,95
20	62	0,40	119	1,00
21	61	0,45	118	1,00
22	60	0,20	120	0,95
23	59	0,25	121	0,90
24	58	0,30	122	0,85
25	57	0,35	128	0,80

Задание 7. Определить расходы свежего воздуха, агента сушки, циркулирующего по материалу и тепла на 1кг испаряемой влаги в сушильной установке с многократной циркуляцией, если известны параметры свежего воздуха, агента сушки и отработавшего агента сушки. Построить графики процессов сушильного цикла на Id -диаграмме.

Таблица 8

№ за дачи	Параметры свежего воздуха		Параметры агента сушки			Параметры отработавшего агента сушки	
	$t_0, ^\circ\text{C}$	φ_0	$t_1, ^\circ\text{C}$	φ	$d_1, \text{г/кг с.в.}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	φ_2
1	51	0,15	90	0,4	250	-	0,95
2	54	0,20	95	-	-	76	0,90
3	56	0,35	106	-	240	-	0,95
4	55	0,40	107	0,3	-	-	0,90
5	57	0,55	115	-	260	-	0,95
6	58	0,60	110	0,32	-	-	0,90
7	59	0,75	95	-	390	-	0,95
8	60	0,60	100	-	-	68	0,90
9	56	0,95	112	-	240	-	0,95
10	55	0,80	108	0,20	-	-	0,85
11	54	0,70	100	-	260	-	0,95
12	53	0,90	118	-	-	81	0,80
13	52	0,65	95	-	250	-	0,90
14	62	0,50	116	-	230	-	0,95
15	64	0,65	109	0,19	-	-	0,85
16	65	0,20	95	-	340	-	0,95
17	66	0,25	105	0,25	-	-	0,90
18	64	0,30	102	-	300	-	0,95
19	63	0,35	99	0,30	-	-	0,85
20	62	0,40	104	-	270	-	0,90
21	61	0,45	112	0,18	-	-	0,95
22	60	0,20	104	-	290	-	0,90
23	59	0,25	106	-	320	-	0,85
24	56	0,30	103	-	-	73	0,90
25	57	0,35	98	0,30	-	-	0,95

2. ТОПОЧНЫЕ ГАЗЫ

Топочный газ, используемый в качестве обрабатывающего агента, образуется при сгорании твердого, жидкого или газообразного топлива в специальных устройствах, называемых *топками*. Его состояние характеризуется теми же параметрами, что и состояние воздуха. При этом физические константы топочного газа и атмосферного воздуха мало отличаются друг от друга. С учетом этого при выполнении технических расчетов

параметров состояния топочного газа могут быть использованы математические зависимости, приведенные в разд. 1.1 «Влажный воздух».

Для определения параметров топочного газа применяется $Id\alpha$ – диаграмма (прил. 3). Порядок пользования $Id\alpha$ – диаграммой такой же, как и Id – диаграммой. $Id\alpha$ – диаграмма дополнительно имеет линии постоянной влажности топлива ($W = \text{const}$) и линии с постоянным значением коэффициента избытка воздуха ($\alpha = \text{const}$). Коэффициент избытка воздуха – это отношение действительного количества воздуха в горючей смеси к теоретически необходимому для ее полного сгорания.

Состояние топочного газа зависит от химического состава топлива, его влажности и условий горения. На деревообрабатывающих предприятиях особенно часто применяют древесное топливо в виде отходов древесины. Данное топливо характеризуется постоянным химическим составом, не зависящим от используемых пород, отсутствием в нем серы и изменчивостью в широком диапазоне влажности. Элементарный химический состав древесного топлива включает углерод (С), водород (Н), кислород (О), азот (N). Кроме того, в нем присутствуют в небольшом количестве элементы, образующие золу (Z). Для абсолютно сухого состояния элементный состав древесного топлива:

$$C_c = 49,2; \quad H_c = 6,1; \quad O_c = 42,0; \quad N_c = 0,7; \quad Z_c = 2,0 \text{ \%}.$$

Содержание любого элемента в рабочем топливе определяется с учетом его фактической влажности по формуле

$$X_p = \frac{X_c(100 - W_{om})}{100}, \quad (18)$$

где X_p, X_c – содержание элемента в рабочем и абсолютно сухом топливе, %;
 W_{om} – относительная влажность топлива, %.

Энтальпия и влагосодержание топочного газа определяют по формулам:

$$I = \frac{Q_s \eta + \alpha g_0 I_0}{g_r}, \quad (19)$$

$$d = \frac{1000 g_n + \alpha g_0 d_0}{g_r}, \quad (20)$$

где Q_s – высшая теплотворная способность топлива, кДж/кг;

η – коэффициент полезного действия топки;

α – коэффициент избытка воздуха;

g_0 – количество воздуха по его сухой части, теоретически необходимое для сжигания топлива, кг/кг;

I_0 и d_0 – энтальпия и влагосодержание подаваемого в топку воздуха, кДж/кг и г/кг, соответственно;

g_r – количество топочного газа по его сухой части, образующегося при сжигании топлива, кг/кг;

g_n – масса пара, образующегося при сжигании топлива, кг/кг.

Высшая теплотворная способность древесного топлива и теоретически необходимое для его сжигания количество воздуха зависят от состава топлива:

$$Q_g = 399C_p + 1256H_p - 109O_p, \quad (21)$$

$$g_0 = 0,115C_p + 0,345H_p - 0,043O_p, \quad (22)$$

Масса сухой части топочного газа и водяного пара, образующихся при полном сжигании 1 кг древесного топлива, рассчитываются по формулам:

$$g_r = 1 + \alpha g_0 - \frac{Z_p + 9H_p + W_{om}}{100}. \quad (23)$$

$$g_n = \frac{9H_p + W_{om}}{100}. \quad (24)$$

Задание 8. Определить с помощью *Idα*-диаграммы *I* – теплосодержание, *d* – влагосодержание, *P* – парциальное давление, *q* – коэффициент избыточного воздуха, *CO₂* – содержание углекислого газа и *w₀* – влажность древесного топлива, если известны температура топочных газов и температуры «сухого» и «мокрого» термометров охлажденной пробы этих газов (табл. 9).

Таблица 9

№ задачи	Температура газов		Температура охлажденной пробы газов	
	$t_g, ^\circ\text{C}$	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$
1	650	108	55	
2	780	92	51	
3	850	110	59	
4	725	62	52	
5	700	90	72	
6	750	50	40	
7	785	92	51	
8	800	95	52	
9	850	100	56	
10	525	100	50	
11	425	62	48	
12	450	60	40	
13	425	62	48	
14	700	92	70	
15	525	99	54	
16	350	70	40	
17	600	60	50	
18	375	70	55	
19	675	90	67	
20	600	70	52	
21	450	60	51	
22	650	60	56	
23	800	90	67	
24	400	60	50	
25	750	58	41	

Задание 9. Определить по $I d \alpha$ - диаграмме неизвестные параметры (I – теплосодержание, d – влагосодержание, P – парциальное давление водяного пара, φ – коэффициент избыточного воздуха, CO_2 – содержание углекислого газа и W_0 – влажность древесного топлива) топочных газов трех состояний по данным табл. 10.

Таблица 10

№ задачи	Газ 1 (метод «точки росы»)		Газ 2 (метод газоанализа)		Газ 3 (метод влажн. воздуха)	
	$t_r, ^\circ C$	$t_d, ^\circ C$	$t_{ca}, ^\circ C$	$CO_2, \%$	$t_r, ^\circ C$	$W_0, \%$
1	450	54	500	6,0	350	55
2	525	54	350	3,5	850	43
3	550	55	700	9,0	500	38
4	575	65	350	4,0	700	60
5	500	62	650	8,5	500	38
6	350	50	800	11,5	600	49
7	400	52	500	5,0	650	47
8	750	69	450	5,5	400	40
9	425	59	500	7,25	700	24
10	550	50	400	5,25	600	60
11	400	54	800	9,0	650	42
12	750	67	400	4,5	500	63
13	650	68	550	7,0	650	52
14	800	53	700	9,25	475	57
15	600	50	725	9,00	525	58
16	800	53	600	6,25	475	57
17	515	70	680	7,25	750	60
18	650	68	800	11,0	800	45
19	785	58	750	12,0	625	51
20	715	54	500	6,5	650	63
21	450	53	545	7,25	360	54
22	645	67	350	9,0	650	51
23	850	64	650	3,75	710	55
24	675	60	750	11,0	825	39
25	700	52	675	14,0	650	49

3. РЕЖИМЫ СУШКИ И ХРАНЕНИЕ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

По заданной характеристике материала (табл. 11):

3.1. - и его назначению подобрать режимы сушки и длительного хранения его после сушки.

3.2. - и режиму сушки определить возможное назначение материала и режима хранения после сушки.

3.3. - и равновесной влажности в период хранения материала после сушки дать характеристику возможных режимов сушки и хранения и возможного назначения материала.

3.4. - и устойчивой влажности сорбции дать характеристику возможных режимов сушки и хранения и указать область возможного применения материала.

3.5. - и устойчивой влажности десорбции дать характеристику возможных режимов сушки и хранения и указать область применения материала.

3.6. - и режиму хранения дать характеристику возможного режима сушки и определить область применения материала.

3.7. - и конечной влажности дать характеристику режимов сушки и хранения и указать область возможного применения материала.

Таблица 11

Характеристика материала, мм	Назначение материала или категория качества	W _к , %	Режим сушки				Условия хранения		W _р , %	W _{у.с.} , %	W _{у.д.} , %
			Категор. режима	Параметры режима			t _с , °C	φ			
				t _с , °C	Δt, °C	φ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Сосна 25x150x6500	Мебельное производство	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. Сосна 40x120x6500	-	-	-	75 80 100	5 10 30	0,8 0,64 0,29	-	-	-	-	-
3. Береза 32x120x4500	-	-	-	-	-	-	20	-	7	-	-
4. Ель 50x175x6500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-
5. Лиственница 40x150x4500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
6. Сосна 32x150x6500	-	-	-	-	-	-	20	0,4	-	-	-
7. Береза 40x175x4500	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8. Сосна 40x150x6500	Экспортный материал	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9. Липа 40x120x4500	-	-	-	75 60 150	4 8 28	0,84 0,7 0,32	-	-	-	-	-
10. Пихта 50x175x6500	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-
11. Лиственница 25x150x4500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-

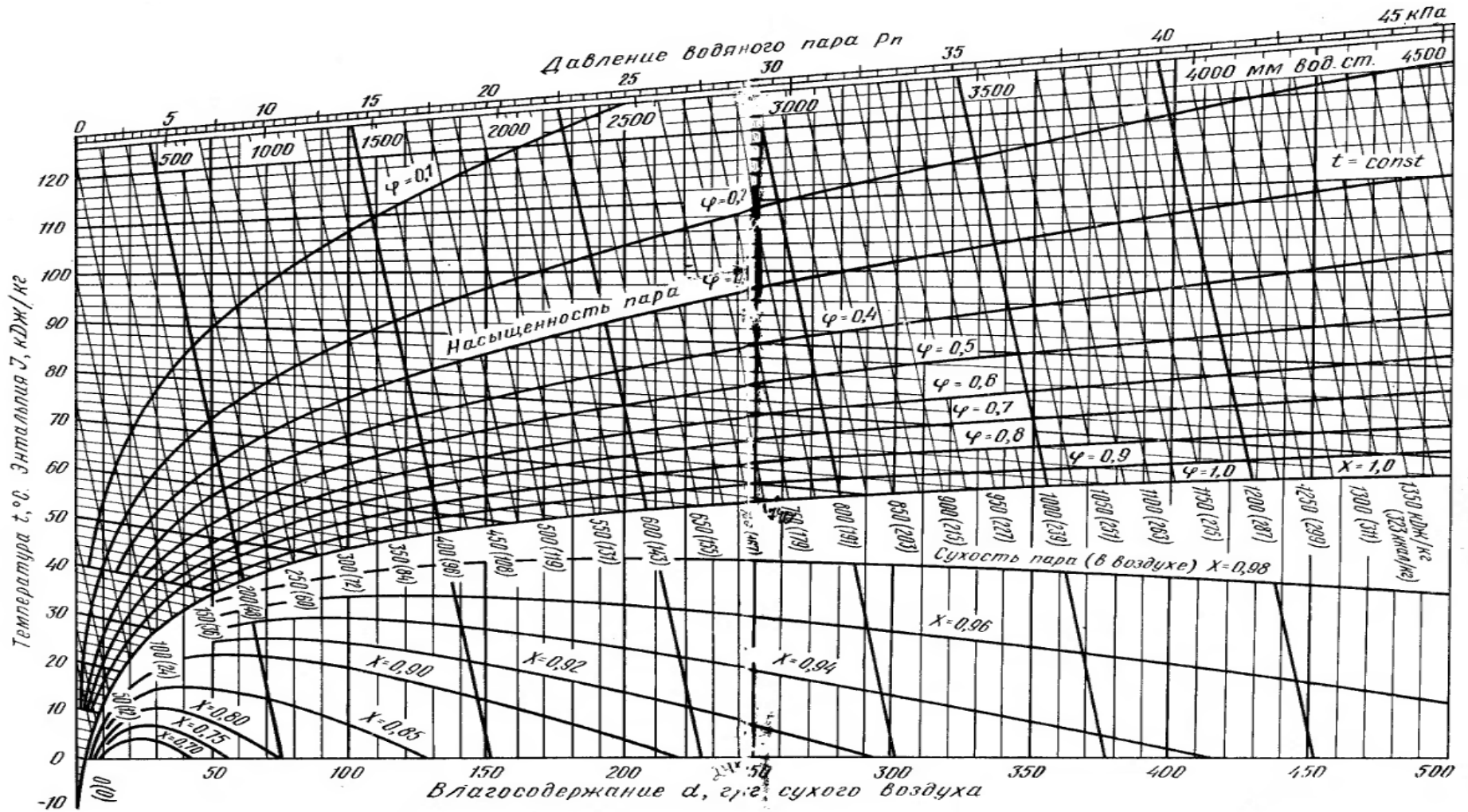
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
12. Осина 32х150х6500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9
13. Ольха 25х150х4500	-	-	-	-	-	-	15	0,45	-	-	-
14. Сосна 75х150х4500	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15. Сосна 32х150х6500	III	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16. Сосна 50х175х4500	-	-	-	87 92 115	6 92 115	0,78 0,64 0,25	-	-	-	-	-
17. Береза 40х150х6500	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-
18. Ель 45х150х4500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-
19. Пихта 25х150х6500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9
20. Береза 32х150х4500	-	-	-	-	-	-	15	0,3	-	-	-
21. сосна 50х150х6500	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22. Сосна 40х120х4500	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23. Береза 32х150х6500	-	-	-	75 80 100	7 11 31	0,73 0,61 0,28	-	-	-	-	-
24. Пихта 40х150х4500	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-	-
25. Осина 25х150х4500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-

Приложение 1

Зависимость давления насыщения водяного пара от температуры
(М.П. Вукалович. Термодинамические свойства воды и
водяного пара. - Машгиз., 1955)

Температура, °С	Давление насыщения, Па	Температура, °С	Давление насыщения, Па	Температура, °С	Давление насыщения, Па	Температура, °С	Давление насыщения, Па
0	610,8	46	10085,4	92	75607,0	138	331710,0
1	656,6	47	10612,0	93	78488,0	139	341370,0
2	705,4	48	11161,0	94	81450,0	140	351250,0
3	757,5	49	11735,0	95	84525,0	141	361360,0
4	812,9	50	12335,0	96	87685,0	142	371700,0
5	871,8	51	12960,0	97	90943,0	143	362280,0
6	934,6	52	13612,0	98	94301,0	144	393110,0
7	1001,2	53	14292,0	99	97760,0	145	404180,0
8	1072,1	54	15001,0	100	101325,0	146	415500,0
9	1147,3	55	15740,0	101	101325,0	147	427070,0
10	1227,1	56	16510,0	102	104996,0	148	438900,0
11	1311,8	57	17312,0	103	108776,0	149	450990,0
12	1401,5	58	18146,0	104	112668,0	150	463340,0
13	1496,7	59	19015,0	105	116675,0	151	475970,0
14	1597,4	60	19919,0	106	120799,0	152	488670,0
15	1704,1	61	20859,0	107	125042,0	153	502050,0
16	1817,0	62	21837,0	108	129408,0	154	515520,0
17	1936,4	63	22854,0	109	133896,0	155	529260,0
18	2962,6	64	23910,0	110	138515,0	156	543310,0
19	2196,0	65	25008,0	111	143260,0	157	557640,0
20	2336,8	66	26148,0	112	148140,0	158	572280,0
21	2485,5	67	27332,0	113	153160,0	159	587220,0
22	2642,4	68	28561,0	114	158320,0	160	602480,0
23	2807,9	69	29837,0	115	163610,0	161	618040,0
24	2982,4	70	31161,0	116	169050,0	162	633930,0
25	3166,3	71	32533,0	117	174640,0	163	650140,0
26	3360,0	72	33957,0	118	180380,0	164	666680,0
27	3563,9	73	35433,0	119	186260,0	165	683550,0
28	3778,5	74	36963,0	120	192330,0	166	700750,0
29	4004,3	75	38548,0	121	198540,0	167	718300,0
30	4241,7	76	40190,0	122	204910,0	168	736200,0
31	4491,3	77	41890,0	123	211450,0	169	754450,0
32	4753,6	78	43650,0	124	218150,0	170	773050,0
33	5029,0	79	45473,0	125	225030,0	171	792020,0
34	5318,2	80	47359,0	126	232090,0	172	811360,0
35	5621,7	81	49310,0	127	239320,0	173	831060,0
36	5940,1	82	51328,0	128	246740,0	174	851140,0
37	6274,0	83	53415,0	129	254340,0	175	871610,0
38	6624,0	84	55572,0	130	262130,0	176	892460,0
39	6990,7	85	57802,0	131	270120,0	177	913760,0
40	7374,9	86	60107,0	132	278300,0	178	935340,0
41	7777,2	87	62488,0	133	185580,0	179	957390,0
42	8198,3	88	64947,0	134	295270,0	180	979840,0
43	8639,0	89	64786,0	135	304060,0	181	1002700,0
44	9099,8	90	70108,0	136	313060,0	-	-
45	9581,7	91	72814,0	137	322270,0	-	-

*I*d-диаграмма



Ida-диаграмма

