

О СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ В ВАКУУМЕ.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Содержание влаги в древесине характеризуется величиной отношения массы влаги в древесине $M_{вл}$ к массе древесины в абсолютно сухом состоянии $M^{abc}_{сух}$. Это отношение, выраженное в отн. единицах или процентах, называют ВЛАЖНОСТЬЮ. Влажность определяется по выражению:

$$w = M_{вл} / M^{abc}_{сух} = (M_{нач} - M^{abc}_{сух}) / M^{abc}_{сух}, \text{ отн.ед.}$$

$$W = 100 * w, \%$$

где: $M_{нач}$ - начальная масса древесины.

Влага в древесине может находиться как в полостях клеток, так и в их стенках. Влагу, находящуюся в полостях клеток и в пространствах между клетками, называют свободной, а в клеточных стенках - связанной или гигроскопической.

Содержание связанной влаги в древесине ограничено. Состояние, при котором стенки клеток имеют максимальную влажность $W_{пн}$ при соприкосновении их с ЖИДКОЙ влагой, называется ПРЕДЕЛОМ ИХ НАСЫЩЕНИЯ. В этом состоянии древесина имеет максимальный объем, который не изменяется и при более высокой влажности.

Для большинства отечественных пород $W_{пн}$, практически не зависит от породы и составляет в среднем 30 %.

Если влажность древесины более $W_{пн}$, т.е. выше 30 %, то это значит, что в древесине содержится свободная влага.

Если древесину длительное время выдерживать в воздухе неизменного состояния, то ее влажность будет стремиться к определенной величине W_y , которая называется устойчивой влажностью (иначе - равновесная влажность W_p). Устойчивой влажности древесина может достигнуть, либо поглощая влагу из воздуха (сорбция), либо отдавая ее в воздух (десорбция).

Влагу из воздуха могут поглощать только клеточные стенки. Появление СВОБОДНОЙ влаги в изначально СУХОЙ древесине невозможно, даже если воздух будет насыщен водяным паром. Устойчивая максимальная влажность, которую приобретает СУХАЯ древесина при длительной выдержке в воздухе, насыщенном влагой (т.е при значении относительной насыщенности или влажности ВОЗДУХА $\phi_{\%} = 100\%$, или $\phi = 1,0$), называется влажностью предела гигроскопичности $W_{пг}$.

ПРЕДЕЛ ГИГРОСКОПИЧНОСТИ, следовательно, такое состояние, при котором сухая древесина поглотила путем сорбции максимально возможное количество связанной влаги, но не содержит свободной.

При комнатной температуре влажность предела гигроскопичности $W_{\text{пг}}$ составляет около 30 %, т.е. численно равна $W_{\text{пн}}$. Но в отличие от последней влажность предела гигроскопичности $W_{\text{пг}}$, снижается при повышении температуры:

$$W_{\text{пг}} \approx (36 - 17 \cdot t / 100), \%$$

(при температуре 100°C она составляет около 19 %). Равновесная влажность W_p древесины определяется только температурой «t» и степенью насыщенности «φ» воздуха:

$$W_p \approx (7,55 - 3,56 \cdot t / 100) / (1,21 - \varphi) = W_{\text{пг}} \cdot 0,21 / (1,21 - \varphi), \%$$

При снижении влажности древесины W наблюдается уменьшение её линейных размеров и объема. Это явление называется усушкой. Она имеет место лишь при уменьшении количества СВЯЗАННОЙ влаги и начинается для СЫРОЙ древесины от предела насыщения $W_{\text{пн}}$, т.е от 30 %. Усушка прекращается при достижении древесиной абсолютно сухого состояния. Изменение содержания в древесине СВОБОДНОЙ влаги не вызывает изменения ее размеров.

Усушка приблизительно прямо пропорциональна изменению ΔW влажности древесины. Снижение влажности от предела насыщения клеточных стенок $W_{\text{пн}}$ до нуля дает наибольшую усушку, которая называется ПОЛНОЙ и обозначается $Y_{\text{п}}$. Полная усушка составляет: в тангенциальном направлении - 6...10 %, в радиальном - 3...5 %, а полная объемная усушка - 12...15 %.

Частичная усушка Y_w , или усушка древесного образца от предела насыщения $W_{\text{пн}}$ до заданной влажности «W», рассчитывается по выражению:

$$Y_w = Y_{\text{п}} \cdot (1 - W / W_{\text{пн}}) = (Y_{\text{п}} / 30) \cdot (30 - W) = \alpha \cdot \Delta W,$$

$$Y_w = \alpha \cdot \Delta W,$$

$$\text{где: } \Delta W = (W_{\text{пн}} - W),$$

$$\alpha = Y_{\text{п}} / W_{\text{пн}} - \text{коэффициент усушки.}$$

Полная объемная усушка $Y_{\text{по}}$, %, может быть приближенно определена по формуле:

$$Y_{\text{п об}} = 0,028 \cdot \rho_{\text{б}},$$

а полная усушка в тангенциальном и радиальном направлениях, соответственно,

$$U_{п\ танг} = 0,018 * \rho_б; U_{п\ рад} = 0,01 * \rho_б;$$

здесь:

$\rho_б$ - базисная плотность, которая характеризует массу образца в абсолютно сухом состоянии в единице объема сырой (при влажности $W > W_{пн}$) древесины.

Базисная плотность $\rho_б$ древесины определяется ее породой.

Таблица из [1]:

Таблица. Средняя базисная плотность древесины основных пород

Порода	$\rho_б$, кг/м ³	Порода	$\rho_б$, кг/м ³	Порода	$\rho_б$, кг/м ³
Кедр	350	Ольха	420	Бук	530
Ель	360	Береза	500	Ясень	540
Сосна	400	Лиственница	520	Дуб	560

2. СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ СУШКИ.

Основным способом сушки в деревообрабатывающей промышленности является конвективная сушка в газообразной среде. Главным признаком, характеризующим ее протекание, является особенность парообразования, по которому процессы сушки могут быть подразделены на две группы:

I. Конвективные **низкотемпературные**, (температура древесины ниже температуры кипения воды при данном давлении);

образование пара проходит при испарении влаги;

II. Конвективные **высокотемпературные** (температура выше температуры кипения воды при данном давлении);

пар образуется в результате кипения влаги в материале.

ПРЕЖДЕ ЧЕМ ГОВОРИТЬ О СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ В ВАКУУМЕ, РАССМОТРИМ:

1) **НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПРОЦЕСС КОНВЕКТИВНОЙ КАМЕРНОЙ СУШКИ.**

Это основной способ сушки пиломатериалов. Главной причиной перемещения влаги в этом процессе является перепад влажности по толщине сортамента, а посредником служит процесс теплопроводности, характеризуемый одноименным коэффициентом.

Таблица 6.1

Исходная продолжительность сушки $\tau_{исх}$ пиломатериалов, ч, в камерах периодического действия при низкотемпературном процессе

Толщина пиломатериалов, S_1 , мм	Ширина пиломатериалов S_2 , мм					
	40 - 50	60 - 70	80 - 100	110 - 130	140 - 180	более 180 и для необрезных
	Бук, клен, берест, ясень, ильм					
До 16	58	59	61	63	63	63
19	65	68	71	73	73	74
22	73	77	80	81	82	83
25	91	94	96	99	101	102
32	102	109	115	118	120	122
40	114	126	140	152	159	167
50		170	199	225	239	255
60		250	296	339	367	396
75			591	657	728	805

Исходная продолжительность сушки « $\tau_{исх}$ » дана для перепада влажности от $W_{нач} = 60\%$ до $W_{конеч} = 12\%$.

Например, для доски бука толщиной « S » = 50 мм и шириной « b » более 180 мм: $\tau_{исх}^{конв} = 255$ часов.

При других перепадах влажностей значение « $\tau_{исх}$ » из табл. 6.1 нужно умножить на значение коэффициента « A_B » из табл. 6.3:

$$\tau_{конв}^{W_{нач} \rightarrow W_{конеч}} = A_B * \tau_{исх}^{конв}$$

Например, для перепада влажности от $W_{нач} = 60\%$ до $W_{конеч} = 20\%$ значение коэффициента « A_B » = 0,68 и время сушки $\tau_{конв}^{60\% \rightarrow 20\%} = 0,68 * 255 = 173,4$ часа.

Таблица 6.3

Значения коэффициента A_B

Начальная влажность, W_N , %	Конечная влажность W_k , %											
	22	20	18	16	14	12	11	10	9	8	7	6
120	1,07	1,12	1,18	1,25	1,33	1,43	1,49	1,55	1,61	1,68	1,76	1,86
110	1,00	1,06	1,12	1,20	1,28	1,37	1,43	1,49	1,55	1,62	1,71	1,81
100	0,94	1,00	1,06	1,14	1,22	1,31	1,37	1,43	1,50	1,57	1,65	1,75
90	0,87	0,93	1,00	1,07	1,16	1,25	1,30	1,36	1,43	1,51	1,58	1,68
80	0,80	0,86	0,93	1,00	1,09	1,18	1,23	1,29	1,35	1,43	1,51	1,61
70	0,72	0,78	0,84	0,92	1,00	1,10	1,15	1,21	1,27	1,35	1,43	1,52
65	0,67	0,74	0,80	0,87	0,96	1,05	1,10	1,16	1,23	1,30	1,38	1,48
60	0,62	0,68	0,75	0,82	0,91	1,00	1,05	1,11	1,18	1,25	1,33	1,43
55	0,57	0,63	0,69	0,77	0,85	0,94	1,00	1,06	1,12	1,20	1,28	1,38
50	0,51	0,57	0,63	0,71	0,79	0,89	0,94	1,00	1,06	1,14	1,22	1,32
45	0,44	0,50	0,57	0,64	0,73	0,82	0,87	0,93	1,00	1,07	1,15	1,25
40	0,37	0,43	0,49	0,57	0,65	0,75	0,80	0,86	0,93	1,00	1,08	1,18
35	0,29	0,35	0,43	0,49	0,57	0,66	0,72	0,78	0,84	0,92	1,00	1,10
30	0,19	0,25	0,32	0,39	0,48	0,57	0,62	0,68	0,75	0,82	0,90	1,00
28	0,15	0,21	0,27	0,35	0,43	0,53	0,58	0,64	0,71	0,78	0,86	0,96
26	0,10	0,16	0,23	0,31	0,38	0,48	0,54	0,59	0,66	0,73	0,82	0,91
24	0,06	0,11	0,18	0,27	0,33	0,43	0,49	0,54	0,61	0,68	0,77	0,86
22	-	0,06	0,13	0,22	0,28	0,38	0,43	0,49	0,56	0,63	0,71	0,81
20	-	-	0,07	0,14	0,22	0,32	0,37	0,43	0,49	0,57	0,65	0,75

для **1-ГО ЭТАПА** по режиму сушки 6-Б , например, для бука 50 мм заданы:

$$t_1 = 57^\circ\text{C} \text{ и } \phi_1 = 0,85:$$

при этих параметрах равновесная влажность для поверхностных слоёв составит:

$$W_{p1}^{\text{конв}} \approx (7,55 - 3,56 * t / 100) / (1,21 - \phi) = (7,55 - 3,56 * 57 / 100) / (1,21 - 0,85) = 15,3\%,$$

перепад влажности для поверхностных слоёв относительно центра составит:

$$\Delta W_{p1}^{\text{конв}} = (W_{\text{пн}} - W_{\text{пов1}}) = (W_{\text{пн}} - W_{p1}^{\text{конв}}) = 30 - 15,3 = 14,7\%,$$

усушка Y_{w1} для поверхностных слоёв относительно центра, имеющего влажность $W_{\text{пн}}$ составит в долях от полной $Y_{\text{п}}$:

$$Y_{w1}^{\text{пов}} = Y_{\text{п}} * (1 - W_{p1}^{\text{конв}} / 30) = Y_{\text{п}} * (1 - 15,3 / 30) = 0,51 * Y_{\text{п}}$$

для **2-ГО ЭТАПА** по режиму сушки 6-Б для бука 50 мм заданы:

$$t_1 = 61^\circ\text{C} \text{ и } \phi_1 = 0,74:$$

при этих параметрах равновесная влажность для поверхностных слоёв составит:

$$W_{p2}^{\text{конв}} \approx (7,55 - 3,56 * t / 100) / (1,21 - \phi) = (7,55 - 3,56 * 61 / 100) / (1,21 - 0,74) = 11,4 \%,$$

перепад влажности для поверхностных слоёв относительно центра составит:

$$\Delta W_{p2}^{\text{конв}} = (W_{\text{пн}} - W_{\text{пов2}}) = (W_{\text{пн}} - W_{p2}^{\text{конв}}) = 30 - 11,4 = 18,6 \%,$$

усушка для поверхностных слоёв относительно центра составит в долях от полной:

$$Y_{w2}^{\text{пов}} = Y_{\text{п}} * (1 - W_{p2}^{\text{конв}} / 30) = Y_{\text{п}} * (1 - 11,4 / 30) = 0,62 * Y_{\text{п}}$$

ТЕПЕРЬ РАССМОТРИМ:

2) **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПРОЦЕСС СУШКИ (В/Т ПРОЦЕСС),**

как **КОНВЕКТИВНЫЙ** при **атмосферном** давлении, так и **ВАКУУМНЫЙ** при **пониженном** давлении.

- При конвективной сушке тепло передаётся от нагревателя к древесине, по определению, за счёт конвекции.

- При вакуумной сушке тепло передаётся от нагревателя к древесине либо излучением, либо кондуктивно (соприкосновением).

В основе работы установок, не использующих конвекции для реализации высокотемпературного процесса - вакуумных и пресс-вакуумных (безотносительно конструктивных отличий и особенностей исполнения оборудования конкретным производителем), лежат **два** обязательных условия.

- **Первое** условие заключается в том, что пиломатериал загружается в камеру послойно с плоскими нагревателями - греющими пластинами - этим обеспечивается равномерная и интенсивная теплопередача.

- **Второе** условие - температура $t_{\text{нагр}}$ поверхности нагревателей превышает температуру $t_{\text{кип}}$ насыщения (кипения) при созданном в установке давлении (разрежении) - по определению в/т процесса.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРЕСС-ВАКУУМНЫХ КАМЕР.

При сушке в полости камеры создается $p_{\text{абс}}$ - пониженное давление относительно $p_{\text{атм}}$ - атмосферного. В пресс-вакуумной установке верхняя её крышка выполнена в виде металлической рамки с гибкой мембраной (обычно из силиконовой резины). За счет разности давлений $\Delta p = (p_{\text{атм}} - p_{\text{абс}})$ создается сжимающее усилие между пиломатериалом и нагревателями, передаваемое послойно на металлическую конструкцию днища камеры. Это прижимающее усилие (порядка 8 тн/м^2), во-первых, фиксирует идеально плоскую форму досок, во-вторых, обеспечивает плотное прилегание поверхности пиломатериалов к нагревателям, что очень важно в случае, если теплопередача от них осуществляется *кондуктивным* путем. Однако, в этом варианте необходима точная *калибровка* по толщине пиломатериала для исключения неплотности прилегания досок к нагревателям.

Для того, чтобы обеспечить равномерность теплопередачи от нагревателей к поверхности досок без их калибровки, разумно организовать нагрев древесины тепловым излучением через небольшой зазор между плоскостью нагревателей и пиломатериалом, специально созданный за счет специальных выступов греющих пластин (такие выступы есть, например, в установках, которые выпускает компания «Энергия Термо Ставрополь»). Теплопередача излучением в плоском зазоре не зависит как от его величины, так и от неизбежного разбега пиломатериала по толщине.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В ВАКУУМНЫХ КАМЕРАХ.

На первом этапе - наиболее опасном с точки зрения появления дефектов сушки - температура древесины « $t_{\text{др}}$ » при нагреве повышается до значения температуры насыщения « $t_{\text{нас}}$ » = « $t_{\text{кип}}$ » сначала на её поверхности. При этом образуется узкая **зона парообразования**, в которой происходит интенсивное испарение свободной воды древесины (псевдокипение). Псевдокипение происходит и в толще пиломатериала по мере перемещения вглубь этой **зоны**

парообразования. В течение всей первой стадии сушки происходит продвижение образовавшегося водяного пара наружу и одновременно заглублиение зоны выпаривания вплоть до центральной плоскости.

Энергия теплового потока затрачивается, в основном, на кипение свободной влаги внутри материала. В результате в древесине образуется избыточное давление $p_{изб}^{др}$, и пар выходит через капилляры подсушенной наружной зоны в окружающую среду. Пока во внутренних зонах сортифта содержится СВОБОДНАЯ влага, температура « $t_{внутр}^{др}$ » в ней не может подняться выше ТОЧКИ КИПЕНИЯ « $t_{кип}$ ». До этого времени при сохранении теплового потока от поверхности к зоне парообразования имеет место устойчивое молярное движение влаги в виде пара в обратном направлении.

- 2.1. Сушка в вакууме при удалении СВОБОДНОЙ влаги **НАЧИНАЕТСЯ** по режимным ($t_1^{конв} = 57^\circ\text{C}$ и $\phi_1^{конв} = 0,85$) параметрам для **первого этапа** конвективной сушки, например, бука 50 мм, т.е при той же температуре $t_1^{вак} = 57^\circ\text{C}$, но с учётом того важного факта, что при кипении $\phi_1^{вак} = 1,0$. Для того, чтобы обеспечить значение $t_{кип} = 57^\circ\text{C}$, необходимо понизить давление в камере до величины:

$$p_{абс}^{t_{кип} 57^\circ\text{C}} = 0,173 \text{ бар.}$$

Смотри данные по:

Александров А.А., Григорьев Б.А.
А 465 Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара:
Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных дан-
ных. ГСССД Р-776-98 — М.: Издательство МЭИ. 1999. —
168 с.; ил.

,[3]:

ТАБЛИЦЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА В СОСТОЯНИИ НАСЫЩЕНИЯ
(ПО ТЕМПЕРАТУРЕ)

Таблица 1

t	p	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''	$s''-s'$
57	$1,7335 \cdot 10^4$	0,0010155	8,7471	238,61	2603,6	2365,0	0,7934	7,9568	7,1634
58	$1,8171 \cdot 10^4$	0,0010161	8,3688	242,79	2605,4	2362,6	0,8060	7,9405	7,1344
59	$1,9041 \cdot 10^4$	0,0010166	8,0093	246,97	2607,1	2360,1	0,8186	7,9243	7,1056
60	$1,9946 \cdot 10^4$	0,0010171	7,6677	251,15	2608,8	2357,7	0,8312	7,9082	7,0770
61	$2,0887 \cdot 10^4$	0,0010176	7,3428	255,34	2610,6	2355,2	0,8438	7,8922	7,0485
62	$2,1866 \cdot 10^4$	0,0010182	7,0338	259,52	2612,3	2352,8	0,8563	7,8764	7,0201
63	$2,2884 \cdot 10^4$	0,0010187	6,7399	263,71	2614,1	2350,3	0,8687	7,8607	6,9919
77	$4,1941 \cdot 10^4$	0,0010271	3,8198	322,36	2638,0	2315,6	1,0396	7,6528	6,6132

Равновесная влажность при этом для поверхностных слоёв составит:

$$W_{p1}^{вак} \approx (7,55 - 3,56 \cdot t/100)/(1,21 - \phi) = (7,55 - 3,56 \cdot 57/100)/(1,21 - 1,0) = 26,2\%.$$

Перепад влажности для поверхностных слоёв относительно центра составит:

$$\Delta W_{p1}^{\text{конв}} = (W_{\text{пн}} - W_{\text{пов}}) = (W_{\text{пн}} - W_{p1}^{\text{вак}}) = 30 - 26,2 = 3,8\%.$$

Усушка для ПОВЕРХНОСТНЫХ слоёв относительно центра составит в долях от полной:

$$Y_{w \text{ нач}}^{\text{пов}} = Y_{\text{п}} * (1 - W_{p1}^{\text{конв}} / 30) = Y_{\text{п}} * (1 - 26,2 / 30) = 0,127 * Y_{\text{п}}.$$

Т.к $\varphi_1^{\text{конв}} = 0,85 < \varphi_{1\text{вак}}^{\text{пов}} = 1,0$, то условия на поверхности при начале удаления СВОБОДНОЙ влаги для вакуумной сушки гораздо мягче, чем при конвективной сушке.

2.2. Удаление СВОБОДНОЙ влаги при сушке в вакууме **ЗАКАНЧИВАЕТСЯ** по режимным ($t_2^{\text{конв}} = 61^\circ\text{C}$ и $\varphi_2^{\text{конв}} = 0,74$) параметрам для второго этапа конвективной сушки, например, бука 50 мм, т.е при той же температуре на поверхности сортамента $t_2^{\text{вак}} = 61^\circ\text{C}$, но при этом давление в камере остаётся равным $p_{\text{абс}} = 0,173$ бар.

Чтобы кипение происходило при температуре $t_2^{\text{конв}} = 61^\circ\text{C}$ давление в камере должно бы составлять $p_{\text{кип}}^{61^\circ\text{C}} = 0,209$ бар, т.е на поверхности при $p_{\text{абс}}^{\text{ткип } 57^\circ\text{C}} = 0,173$ бар относительная влажность пара составит:

$$\varphi_{2 \text{ вак}}^{\text{пов}} = (p_{\text{абс}}^{\text{ткип } 57^\circ\text{C}} / p_{\text{кип}}^{61^\circ\text{C}}) = 0,173 / 0,209 = 0,828.$$

Т.к $\varphi_2^{\text{конв}} = 0,74 < \varphi_{2\text{вак}}^{\text{ц}} = 1,0$ и $\varphi_2^{\text{конв}} = 0,74 < \varphi_{2 \text{ вак}}^{\text{пов}} = 0,828$,

Таким образом, условия как на поверхности, а тем более в центре при завершении удаления СВОБОДНОЙ влаги для вакуумной сушки гораздо мягче, чем при конвективной сушке.

2.3. Удаление СВЯЗАННОЙ влаги при сушке в вакууме **ЗАКАНЧИВАЕТСЯ** по режимным ($t_3^{\text{конв}} = 77^\circ\text{C}$, $\varphi_3^{\text{конв}} = 0,34$) параметрам для третьего этапа конвективной сушки, например, бука 50 мм, т.е при той же температуре на поверхности сортамента $t_3^{\text{вак}} = 77^\circ\text{C}$, но при этом давление в камере остаётся равным $p_{\text{абс}} = 0,173$ бар.

Чтобы кипение происходило при температуре $t_3^{\text{вак}} = 77^\circ\text{C}$ давление в камере должно бы составлять $p_{\text{кип}}^{77^\circ\text{C}} = 0,419$ бар, т.е на поверхности при $p_{\text{абс}}^{\text{ткип } 57^\circ\text{C}} = 0,173$ бар относительная влажность пара составит:

$$\varphi_{3 \text{ вак}}^{\text{пов}} = (p_{\text{абс}}^{\text{ткип } 57^\circ\text{C}} / p_{\text{кип}}^{77^\circ\text{C}}) = 0,173 / 0,419 = 0,413.$$

2.4. Из выражения для определения равновесной влажности:

$$W_p^{\text{конеч}} \approx (7,55 - 3,56 * t / 100) / (1,21 - \phi), \%$$

вычисляем значения « $W_p^{\text{конеч}}$ », которые будет иметь древесина при температурах « $t_{\text{нагр}}^{\text{конеч}}$ » нагревательных пластин, равных « $t_3^{\text{вак}} = 77^\circ\text{C}$ » и, для справки, при « $t_{\text{нагр}} = 100^\circ\text{C}$ ».

$t_{\text{нагр}}, ^\circ\text{C}$	77	100
$p_{\text{абс}}^{\text{нагр}}, \text{бар}$	0,419	1,014
$\phi_{p \text{ абс}}$	$0,173/0,419=0,413$	$0,173/1,014=0,1706$
$W_p, \%$	6,03	3,83

Таким образом, при температуре нагревательных пластин, равной:

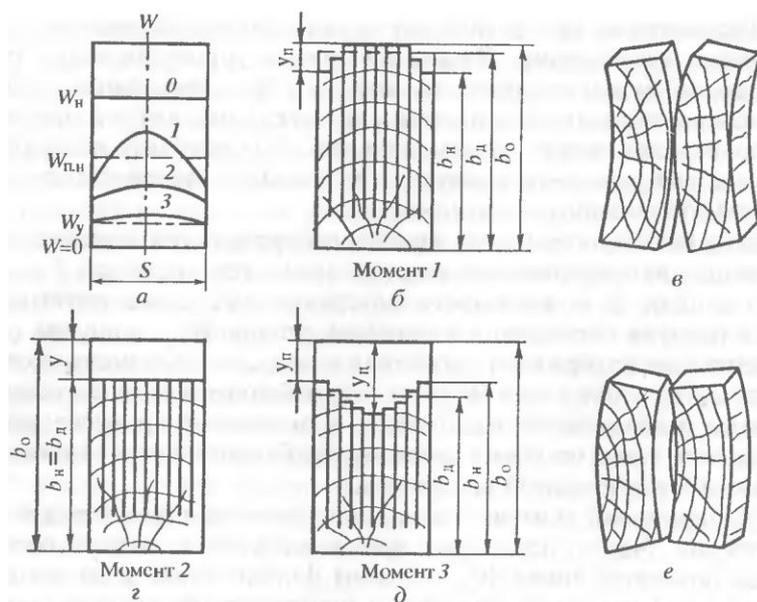
$$t_2^{\text{нагр. пл}} = \mathbf{77^\circ\text{C}},$$

обеспечивается конечная влажность высушенной древесины не ниже:

$$W_{\text{конеч}} = \mathbf{6,03}$$

3. НАПРЯЖЕНИЯ В ДРЕВЕСИНЕ ПРИ СУШКЕ.

На протяжении сушки влажность внутренних слоев выше влажности слоев, лежащих ближе к поверхности. Это приводит к неравномерной усушке материала, которая и является причиной образования в древесине сушильных напряжений.



Схемы к развитию деформаций и напряжений в древесине при конвективной сушке:

a - кривые распределения влажности по толщине пластины в моменты 0 - 3 процесса сушки; *б*, *г*, *д* - секции, раскроенные на тонкие слои; *в*, *е* - секции, раскроенные на толстые слои.

На рис. *a* показаны кривые распределения влажности по толщине для наиболее характерных моментов процесса: 0 - начало сушки; 1 - влажность поверхностных слоев $W_{\text{пов}}$ опустилась ниже предела насыщения клеточных стенок $W_{\text{пн}}$, а внутри сортамента еще содержится свободная влага; 2 - влажность по всему сечению стала ниже $W_{\text{пн}}$, но еще наблюдается существенный перепад влажности по толщине; 3 - окончание процесса, когда влажность стала по всему сечению $W_{\text{ср}}$ приблизительно одинаковой, близкой к равновесной влажности $W_{\text{рз}}$.

В начальный момент усушка и напряжения в материале отсутствуют.

Через некоторое время в первой стадии процесса влажность поверхностных слоев $W_{\text{пов}} = W_{\text{р1}}$ опустится ниже $W_{\text{пн}}$ (момент 1), появится перепад влажности $\Delta W = (W_{\text{пн}} - W_{\text{пов}})$, что ведет к их усушке U_w . Однако усушка не может полностью проявиться вследствие противодействия внутренних слоев, усушка которых еще не началась.

Начавшуюся усушку можно выявить, если из высушиваемого сортамента выпилить по всему поперечному сечению пластинку (секцию) и разделить ее на ряд слоев по толщине (рис. *б*) Сделав это, можно увидеть, что внутренние слои сохранили первоначальный размер по ширине доски b_0 , а поверхностные слои усохли на величину $U_{\text{п}}$, и в свободном состоянии приняли свой номинальный (соответствующий их влажности) размер $b_{\text{н}}$. Целая, неразрезанная секция имеет действительную ширину $b_{\text{д}}$, меньшую b_0 , но большую $b_{\text{н}}$. Так как действительный размер поверхностных слоев больше их номинального, они испытывают напряжения растяжения, а внутренние слои, действительный размер которых меньше первоначального b_0 , испытывают напряжение сжатия.

Чтобы обнаружить возникающие напряжения, нужно разделить образец на части. Каждая такая часть будет стремиться к новому равновесному состоянию, что возможно только за счет ее деформации. В секции, разрезанной на тонкие слои по схеме рис. *б* деформации проявляются в виде укорочения или удлинения слоев. В секции, распиленной или расколотой пополам (схема рис. *в*), эти деформации будут носить характер изгиба. Если бы древесина была идеально упругим материалом, то напряжения, появившиеся в ней в первой стадии процесса, по мере снижения перепада

влажности ΔW постепенно уменьшались и исчезли бы при $\Delta W \rightarrow 0$.

Фактически напряжения в древесине исчезают на некотором промежуточном этапе процесса (момент 2; форма сечения рис.з), а затем в конце сушки возрастают, изменив свой знак. Причина этого - развитие в древесине остаточных деформаций.

В начальной стадии процесса, когда влажная нагретая древесина обладает повышенной пластичностью, в поверхностных слоях под влиянием действующих в них растягивающих напряжений возникают остаточные деформации удлинения, а во внутренних слоях, наоборот, остаточные деформации укорочения.

Эти деформации сохраняются на всем протяжении процесса. Происходит это потому, что с понижением влажности повышается модуль упругости древесины «Е», ее жесткость возрастает, а остаточные деформации фиксируются и становятся упругими. В результате к концу процесса (момент 3) усадка на поверхности $U_{\text{п}}$ окажется меньше, чем усадка внутри сортифта $U_{\text{ц}}$. Размер поверхностных слоев (схема рис.д) будет больше размера внутренних слоев, и в древесине, следовательно, появятся сжимающие напряжения снаружи и растягивающие напряжения внутри. Секция, разрезанная или расколота на две части, будет в этом случае деформироваться согласно схеме рис.е.

Если НАПРЯЖЕНИЯ в той или иной точке по объему сортифта превысят ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ, произойдет РАЗРУШЕНИЕ материала. Предел прочности древесины при растяжении значительно меньше, чем при сжатии. Поэтому **разрушение проявляется в виде разрыва волокон (растрескивания)** в зоне действия растягивающих напряжений, т. е. в первой стадии процесса на поверхности, а в конечной стадии - внутри сортифта.

Схема выше и текст из:

Расев А. И., Косарин А. А.
 Р24 Гидротермическая обработка и консервирование древесины :
 учебное пособие / А. И. Расев, А. А. Косарин. — М. : ФОРУМ,
 2010. — 416 с. : ил. — (Профессиональное образование). [1],

Совершенно избежать в древесине сушильных напряжений как при конвективной сушке, так и при сушке в вакууме, невозможно. Однако при *вакуумной* сушке можно ЗНАЧИТЕЛЬНО их уменьшить на первом этапе проведения процесса.

При наличии перепада влажности $\Delta W_{\text{нар}}^{\text{II}}$ наружные слои получают деформации растяжения:

$$\varepsilon = Y,$$

подвергаясь стеснённой усушке:

$$Y = \alpha * \Delta W_{\text{нар}}^{\text{II}},$$

и испытывая при этом напряжения растяжения:

$$\sigma = E * \varepsilon = E * Y$$

здесь:

σ - напряжения растяжения,

$\varepsilon = Y$ - относительное растяжение поверхностных слоёв,

$Y = (Ш_{n2} - Ш_w) / Ш_{n2}$ - относительная свободная усушка поверхностных слоёв,

$Ш_{n2}$ - ширина доски при её влажности $w \geq w_{\text{ни}}$,

$Ш_w$ - ширина доски при её влажности $w \leq w_{\text{ни}}$ для случая свободной усушки,

α - коэффициент усушки,

E - длительный модуль упругости древесины при заданных w и t .

Например для 1-го этапа по режиму 6-Б **конвективной сушки** для бука толщиной 50 мм при $t_1 = 57^\circ\text{C}$ и $\phi_1 = 0,85$:

равновесная влажность для поверхностных слоёв составит:

$$W_{\text{р1}}^{\text{конв}} \approx (7,55 - 3,56 * t / 100) / (1,21 - \phi) = (7,55 - 3,56 * 57 / 100) / (1,21 - 0,85) = 15,3\%,$$

перепад влажности для поверхностных слоёв относительно центра составит:

$$\Delta W_{\text{р1}}^{\text{конв}} = (W_{\text{пн}} - W_{\text{пов}}) = (W_{\text{пн}} - W_{\text{р1}}^{\text{конв}}) = 30 - 15,3 = 14,7\%,$$

усушка для поверхностных слоёв относительно центра составит в долях от полной усушки:

$$Y_w = Y_{\text{п}} * (1 - W_{\text{р1}}^{\text{конв}} / 30) = Y_{\text{п}} * (1 - 15,3 / 30) = 0,51 * Y_{\text{п}}$$

Сушка в вакууме при удалении СВОБОДНОЙ влаги начинается при той же температуре $t_1 = 57^\circ\text{C}$, но с учётом того, что при кипении $\phi_1 = 1,0$:

равновесная влажность для поверхностных слоёв составит:

$$W_{\text{р1}}^{\text{вак}} \approx (7,55 - 3,56 * t / 100) / (1,21 - \phi) = (7,55 - 3,56 * 57 / 100) / (1,21 - 1,0) = 26,2\%;$$

перепад влажности для поверхностных слоёв относительно центра составит:

$$\Delta W_{p1}^{\text{вак}} = (W_{\text{пн}} - W_{\text{пов}}) = (W_{\text{пн}} - W_{p1}^{\text{вак}}) = 30 - 26,2 = 3,8\%,$$

усушка для поверхностных слоёв относительно центра составит в долях от полной:

$$Y_w = Y_{\text{п}} * (1 - W_{p1}^{\text{конв}} / 30) = Y_{\text{п}} * (1 - 26,2 / 30) = 0,127 * Y_{\text{п}}.$$

Таким образом, при одной и той же температуре сушки t_1 , напряжения в поверхностных слоях при вакуумной сушке $\sigma_{\text{вак}}$ МЕНЬШЕ напряжений в поверхностных слоях при обычной сушке $\sigma_{\text{конв}}$ в:

$$(\Delta W_{p1}^{\text{конв}} / \Delta W_{p1}^{\text{вак}}) = 14,7 / 3,8 = \mathbf{3,86 \text{ раз!}}$$

4. ВРЕМЯ СУШКИ.

I-й ЭТАП, УДАЛЕНИЕ СВОБОДНОЙ ВЛАГИ.

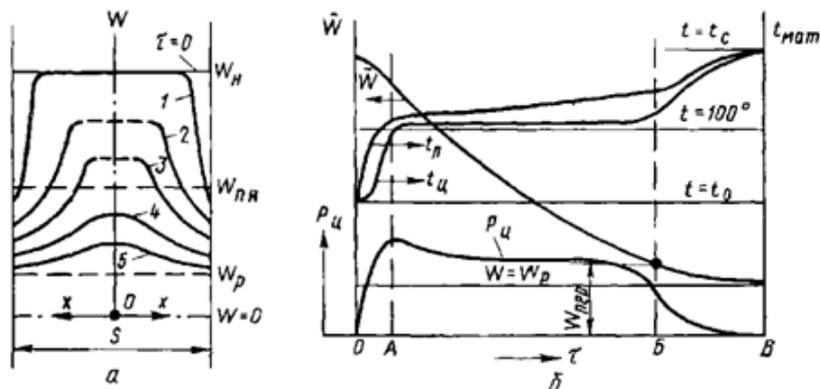
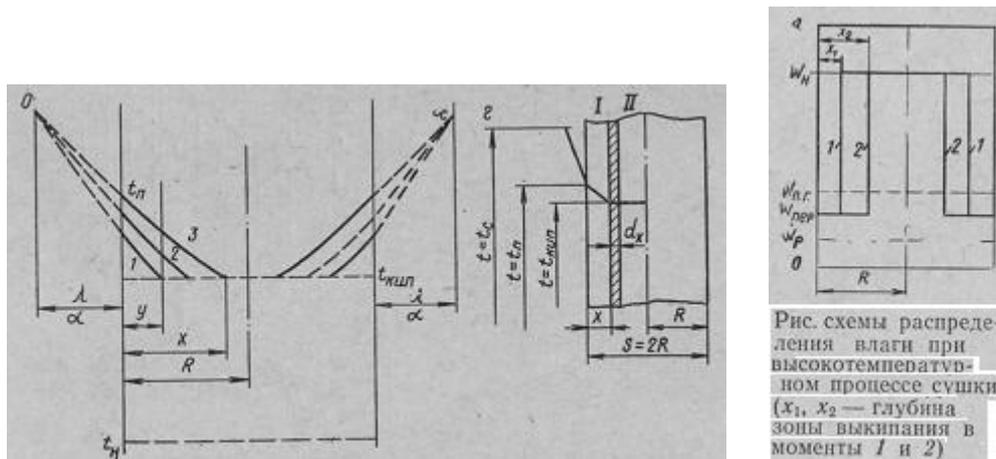


Рис. Основные кривые типично высокотемпературного процесса сушки:
1—5 — кривые распределения влажности по толщине

Рисунок из:

Серговский П. С., Расев А. И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: Учебник для вузов — 4-е изд, перераб и доп.— М.: Лесн пром сть, 1987 — 360 с

, [4].



Физические основы и расчет процессов сушки древесины. Ш у б и н Г. С. «Лесная промышленность», 1973 г., с. 248. [5].

Рассмотрим случай сушки сырой (с начальной влажностью $W_n > W_{пн}$) древесины в форме неограниченной пластины (толщиной/полутолщиной - S/R) в вакууме, нагрев происходит за счёт излучения, нагреватель имеет температуру $t_{нагр}$ (на рис. обозначена как t_c), причём эта температура $t_{нагр}$ выше температуры кипения $t_{квп}$ при данном давлении ($t_{нагр} > t_{квп}$). На некотором промежуточном этапе процесса из наружных зон пластины с координатой « x » удалена вся свободная влага. Влажность этих зон изменяется от равновесной W_p на поверхности до предела гигроскопичности $W_{пг}^{квп}$ при $t_{квп}$ внутри и имеет некоторое среднее значение $W_{пер}$.

При пользовании формулами для высокотемпературного процесса величина $W_{пер}$ определяется характером распределения влаги после достижения в центральной зоне величины $W = W_{п.г.}$ При линейном распределении влаги величина $W_{пер}$ будет

$$W_{пер} = \frac{W_{п.г.квп} + W_p}{2}, \quad [5].$$

$$W_{пер} = (W_{пг} + W_p)/2;$$

$$W_{пг\ квп} \approx 36 - 17 \cdot t_{квп}/100, \%;$$

$$W_p \approx (7,55 - 3,56 \cdot t_{пов}/100)/(1,21 - \varphi_{пов}), \%;$$

$$t_{пов} = t_{квп} + \Delta t,$$

$$\varphi = \rho/\rho_{нас}.$$

Внутренняя зона толщиной ($S - 2x$) на этом этапе остается сырой, имея влажность близкую к начальной W_n . Температура этой внутренней зоны

поддерживается на уровне точки кипения воды « $t_{\text{кип}}$ », а в поверхностных зонах постепенно повышается.

На границе между зонами происходит выпаривание свободной влаги, за счет чего эта граница постепенно заглубляется. За время « $d\tau$ » она переместится на величину « dx ». Объем древесины, высохшей от $W_{\text{н}}$ до $W_{\text{пер}}$ в единицу времени при площади пластины F , составит « $(dx/d\tau) \cdot F$ », а количество теплоты, расходуемой на сушку в единицу времени:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{dx}{d\tau} \dot{F} \rho_{\text{Б}} \frac{W_{\text{н}} - W_{\text{пер}}}{100} r, \quad (0)$$

где:

r - скрытая теплота парообразования ($r = 2,25$ МДж/кг),

$\rho_{\text{Б}}$ - базисная плотность.

Очевидно, с другой стороны, что расход теплоты на выпаривание лимитируется тепловым потоком в поверхностных зонах, обусловленным температурным перепадом ($t_{\text{с}} - t_{\text{кип}}$). Величина этого потока в соответствии с уравнением теплопередачи выражается для рассматриваемого случая уравнением:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{1}{1/\alpha + x/\lambda} (t_{\text{с}} - t_{\text{к}}) F. \quad (1)$$

где:

$\alpha = \alpha_{\text{изл}}$ - коэффициент теплопередачи, в нашем случае - излучением,

λ - коэффициент теплопроводности подсушенной древесины.

Приравняв выражения (0) и (1), получаем дифференциальное уравнение:

$$\frac{dx}{d\tau} \rho_{\text{Б}} \frac{W_{\text{н}} - W_{\text{пер}}}{100} r = \frac{1}{1/\alpha + x/\lambda} (t_{\text{с}} - t_{\text{к}}),$$

после интегрирования которого в пределах от $x = 0$ до $x = S/2$ имеем:

$$\tau_1 = \frac{S \rho_{\text{Б}} r (W_{\text{н}} - W_{\text{пер}})}{200 (t_{\text{с}} - t_{\text{к}})} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{S}{4\lambda} \right). \quad (2)$$

где: S - толщина доски.

Формулы выше из: [4].

Уравнение (2) определяет полную продолжительность τ_1 первого периода процесса до момента выпаривания последней порции свободной влаги из центральной зоны, когда средняя влажность пластины достигает величины $W_{пер}$, называемой переходной влажностью и равной приблизительно:

$$W_{пер} = (W_{пг} + W_p) / 2 = (26,31 + 14,1) / 2 = 20,1\%,$$

где:

$$W_{пг} \approx 36 - 17 * t_{кип} / 100 = 36 - 17 * 0,57 = 26,31 \%,$$

$$W_p \approx (7,55 - 3,56 * t_{пов} / 100) / (1,21 - \varphi_{пов}) = (7,55 - 3,56 * 61 / 100) / (1,21 - 0,828) = 14,1 \%,$$

$$t_{пов} = t_{кип} + \Delta t = 57 + 4 = 61 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\varphi_{2 \text{ вак}}^{пов} = (p_{абс}^{t_{кип} 57^\circ\text{C}} / p_{кип}^{61^\circ\text{C}}) = 0,173 / 0,209 = 0,828.$$

Из формулы:

$$\tau = \frac{S \rho_{усл} (W_n - W_{пер}) r_0}{200 (t_c - t_{кип})} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{S}{4\lambda} \right). \quad [5]$$

(Где $t_c = t_{нагр}$, $\alpha = \alpha_{изл}$ для сушки в вакууме)

для продолжительности полного выкипания влаги (момента достижения зоной выкипания глубины $x = R$ - центра сортимента), когда при заданных условиях $W_{пер} = 20,1\%$:

найдем, что « $\tau_{вак}^{w=0.6}_{w=0.201}$ » - время сушки В ВАКУУМЕ до момента достижения величины $W_{пер} = 20,1\%$, или $w_{пер} \approx 0,2$ составляет менее $\frac{1}{3}$ от « $\tau_{конв}^{60\%}_{20\%}$ » - времени КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ до этого же значения :

$$\tau_{вак}^{w=0.6}_{w=0.201} = 0,05 * 530 * 0,4 * 2,258 * 10^6 [(1/10) + (0,05/4 * 0,25)] / (2 * 8,9) = 201 \ 698 \text{ с} = 201 \ 698 / 3600 = 56,0 \text{ час} = 2,33 \text{ сут},$$

$$\tau_{вак}^{w=0.6}_{w=0.201} = 56,0 \text{ час} = (56,0 / 173,4) * \tau_{конв}^{60\%}_{20\%} = 0,322 * \tau_{конв}^{60\%}_{20\%},$$

$$\text{(при } \tau_{конв}^{60\%}_{20\%} = 0,68 * 255 = 173,4 \text{ часа - см. выше).}$$

Выше обозначено:

$$W_{станд нач} = 60 \%, w_{станд нач} = 0,6;$$

$\rho_{усл} = \rho_B = \rho_б$, обозначения для базисной плотности древесины в разных литературных источниках,

$$r_0 = 2,258 \text{ МДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$\Delta t_{\text{ц}}^{\text{ПОВ}} = q' \cdot R / \lambda = 4^\circ \text{C} (= 61^\circ \text{C} - 57^\circ \text{C}),$$

$$q' = \Delta t_{\text{ц}}^{\text{ПОВ}} \cdot \lambda / R = 4 \cdot 0,25 / 0,025 = 40 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

$$q' = \varepsilon_{\text{ср}} \cdot \alpha_{\text{изл}} \cdot \Delta t_{\text{др}}^{\text{нагр}},$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{др}}^{\text{нагр}} \cdot x \leq R &= (\Delta t_{\text{ц}}^{\text{ПОВ}} \cdot \lambda / R) / (\varepsilon_{\text{ср}} \cdot \alpha_{\text{изл}}) = \Delta t_{\text{ц}}^{\text{ПОВ}} \cdot \lambda / (R \cdot \varepsilon_{\text{ср}} \cdot \alpha_{\text{изл}}) = \\ &= \Delta t_{\text{ц}}^{\text{ПОВ}} \cdot 0,25 / (0,025 \cdot 0,816 \cdot 8,645) = 4 / 0,816 = 5,67^\circ \text{C}, \end{aligned}$$

$t_{\text{нагр}} = 57 + 4 + 5,67 = 66,67^\circ \text{C}$ - температура поверхности нагревателя, при которой обеспечивается это время сушки В ВАКУУМЕ до момента достижения величины $W_{\text{пер}} = 20,1\%$:

$$\tau_{\text{вак}}^{w=0.6}_{w=0.201} = 56,0 \text{ час} = 2,33 \text{ сут},$$

- $\Delta t_{\text{др}}^{\text{нагр}} = (t_{\text{нагр}} - t_{\text{др}}) = (T_{\text{нагр}} - T_{\text{др}})$ - разность температур поверхностей нагревателя и древесины,

$$- T_{\text{ср}} = (T_{\text{н}} + T_{\text{др}}) / 2 = 273 + (66,67 + 61) / 2 = 336,84 \text{ К},$$

$$- T_{\text{ср}}^- = (T_{\text{ср}} / 100) = 3,36;$$

$$- \alpha_{\text{изл}} = 0,227 \cdot (T_{\text{ср}}^-)^3 = 0,227 \cdot (3,36)^3 = 0,227 \cdot 3,36^3 = 8,645 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$\varepsilon_{\text{мин}} = 1 / (1/0,885 + 1/0,82 - 1) = 0,741,$$

$$\varepsilon_{\text{макс}} = 1 / (1/0,95 + 1/0,935 - 1) = 0,891,$$

$$- \varepsilon_{\text{ср}} = (\varepsilon_{\text{мин}} + \varepsilon_{\text{макс}}) / 2 = (0,741 + 0,891) / 2 = 0,816.$$

II-й ЭТАП, УДАЛЕНИЕ СВЯЗАННОЙ ВЛАГИ.

Время досушивания определяется аналогично конвективной сушке:

для перепада влажности от $W_{\text{нач}} = 20\%$ до $W_{\text{конеч}} = 12\%$ значение коэффициента « $A_{\text{в}}$ » = 0,32 и время сушки:

$$\tau_{\text{вак}}^{w=0.6}_{w=0.201} = \tau_{\text{конв}}^{20\%}_{12\%} = A_{\text{в}} \cdot \tau_{\text{исх}}^{\text{конв}} = 0,32 \cdot 255 = 81,6 \text{ часа} = 3,4 \text{ сут}.$$

ОБЩЕЕ ВРЕМЯ СУШКИ.

$$\tau_{\text{вак}}^{w=0.6}_{w=0,12} = \tau_{\text{вак}}^{w=0.6}_{w=0.201} + \tau_{\text{вак}}^{20\%}_{12\%} = 2,33 + 3,4 = 5,73 \text{ сут}$$

ТАКИМ ОБРАЗОМ, СУШИТЬ ДРЕВЕСИНУ В ВАКУУМЕ МОЖНО ЗА ВРЕМЯ В ТРИ РАЗА МЕНЬШЕЕ, ЧЕМ ПРИ СУШКЕ КОНВЕКЦИЕЙ, СОХРАНЯЯ ПРИ ЭТОМ КАЧЕСТВО СУШКИ ПО ГОСТУ И ДАЖЕ ПРЕВЫШАЯ ЕГО.

ЭТИ РАСЧЁТЫ ПОЛНОСТЬЮ ПОДТВЕРЖДАЮТСЯ ПРАКТИКОЙ.

Условные обозначения в тексте:

p - давление, бар;

v, v'' - удельный объём газа, паровой фазы, куб.м/кг;

ρ - плотность газовой среды, кг/м³;

ϕ - относительная влажность воздуха, степень насыщенности пара, отн.ед, %;

T, t - температура по шкалам Кельвина и Цельсия, °К, °С;

$\rho_{др}, \rho_{усл} = \rho_B = \rho_б$ - плотность древесины, плотность древесины базисная, кг/м³;

W, w - влажность древесины %, отн.ед;

W_p', W_p'', ϕ' - равновесная влажность древесины в диапазонах относительной влажности воздуха $\phi = (0-0,5)$ и $\phi'' = (0,5-1,0)$ соответственно;

$W_n, W_{пт}, \%$ - пределы насыщения и гигроскопичности древесины;

a, a' - коэффициенты температуро- и влагопроводности, кв.м/сек;

c - коэффициент теплоёмкости, кДж/(кг*К);

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К);

$\alpha, \alpha_{изл}$ - коэффициент теплопередачи, коэффициент теплопередачи излучением, Вт/(К*м²);

q - плотность теплового потока, Вт/м²;

$T_{нагр}, T_{др}$ - температуры поверхности нагревателей и древесины соответственно, °К;

ε - степень черноты поверхности, отн.ед;

σ - напряжения растяжения, Па, МПа;

$\varepsilon = Y$ - относительное растяжение поверхностных слоёв, отн.ед;

$Y = (Ш_{пт} - Ш_w) / Ш_{пт}$ - относительная свободная усушка поверхностных слоёв, отн.ед;

$Ш_{пт}$ - ширина доски при её влажности $w \geq w_{пт}$, м, мм;

$Ш_w$ - ширина доски при её влажности $w \leq w_{пт}$ для случая свободной усушки, м, мм;

α - коэффициент усушки,

E - длительный модуль упругости древесины при заданных w и t , Па, МПа;

