

13  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра химической технологии древесины

М.И.Ведерникова  
В.П.Орлов  
В.Б.Терентьев  
Т.В.Штеба  
Н.П.Кожвников

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУШИЛЬНЫХ  
УСТАНОВОК ДЛЯ СУШКИ  
ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ**

Часть 1. Технологические и гидродинамические  
Расчеты сушилок

Руководство по курсовому и дипломному проектированию  
для студентов специальностей 240100, 280200, 240502  
дневной и заочной форм обучения

ЕКАТЕРИНБУРГ  
2008

Печатается по рекомендации методической комиссии  
инженерно-экологического факультета.  
Протокол №3 от 13 декабря 2007 г.

Рецензент доц.кафедры ХД и ТЦБП Жвирблите А.К.

Редактор Давлятова Т.В

Подписано в печать 10.05.04 Формат 60x84 1/16  
Плоская печать Печ.л. 2,52  
Заказ № 5222 Поз. 58

Переиздание  
Тираж 20 экз.  
Цена 8,00 р.

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ  
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ

В производстве древесностружечных плит (ДСП) используются стружка, полученная на специальных стружечных станках, измельченная древесина, полученная дроблением древесных отходов лесопильных и деревоотделочных производств, отходы обработки древесины на деревоотделочных станках и другие материалы [1].

Для производства ДСП используют древесные частицы следующих видов и размеров (табл. 1).

Таблица 1

Виды и размеры древесных частиц

Вид древесных частиц	Толщина, $\delta$ , мм	Ширина, $в$ , мм	Длина, $l$ , мм
Специально изготовленные древесные частицы:			
стружка плоская	0,15 - 0,45	0,5 - 12	2 - 40
стружка игольчатая	0,15 - 0,45	До 5	2 - 40
стружка мелкая	0,01 - 0,25	До 2	2 - 5
волокно технологическое	0,01 - 0,30	До 1	2 - 40
Древесные частицы - отходы деревообрабатывающих производств:			
стружка станочная	0,1 - 1,45	До 35	2 - 12
опилки	0,1 - 2,05	До 2,3	2 - 5
пыль технологическая	0,01 - 0,50	До 1	До 1
пыль шлифовальная	0,01 - 0,50	До 1	До 1

Размеры частиц стружки для формирования различных слоёв ДСП приведены в табл.2 [1].

Таблица 2

Размеры частиц для различных слоев ДСП

Параметры древесных час- тиц	Плиты П-2, П-3 с обычной структурой, слой		Плиты П-2 с улучшенной структурой, слой		Плиты П-1 с мелкоструктурной поверхностью, слой	
	наруж- ный	внут- ренний	наруж- ный	внут- ренний	наруж- ный	внут- ренний
Размеры, не более, мм						
Толщина, $\delta$	0,25	0,45	0,25	0,45	0,15	0,45
Ширина, $в$	3	12	2	5	0,5	4
Длина, $l$	25	40	5	30	2	25

Для формирования древесноволокнистых плит (ДВП) используются древесные волокна следующих размеров [1]:

- из лиственных пород -  $d = 0,02 - 0,03$  мм;  $l = 1 - 3$  мм;
- из хвойных пород -  $d = 0,035 - 0,05$  мм;  $l = 1 - 5$  мм.

**Влажность древесины** измеряют в относительных или абсолютных процентах. Перерасчет из одной размерности в другую см. формулы (9), (10). Сырьё, перерабатываемое в стружку, имеет высокую абсолютную влажность ( $\omega_a = 60 - 120\%$ ), которая зависит от породы древесины, способа заготовки и доставки, длительности и условий хранения.

Абсолютная влажность стружки перед смешиванием со связующим должна быть следующей [1]:

- а) для плит на фенолформальдегидных смолах не более 12%
- б) для плит на мочевиноформальдегидных смолах:
  - однослойных 3 – 8%
  - наружных слоёв трёхслойных плит 4 – 6%
  - внутренних слоёв трёхслойных плит 3 – 4%
- в) опилки для прессования изделий 4 – 5%
- г) упаковочная стружка 7 – 18%.

Волокно для производства ДВП после размола обычно имеет абсолютную влажность 50%. После сушки абсолютная влажность волокна должна быть 5 – 6%. *Критическая относительная влажность* ( $\omega_o$ )<sub>кр</sub> древесины в зависимости от породы древесины и способа сушки (контактный, комбинированный, конвективный) может быть принята в пределах от 20 до 26%, а абсолютная критическая влажность ( $\omega_a$ )<sub>кр</sub> = 25 - 35%.

**Плотность древесины** зависит от породы, от района произрастания и от влажности [2]. Насыпная плотность мелкоизмельчённой древесины зависит от породы, от размера частиц и от влажности. Насыпная плотность резаной стружки из берёзы в зависимости от влажности можно принять по табл. 3 [2]. При использовании сырья смешанных пород средневзвешенная плотность определяется по правилу аддитивности по уравнениям:

$$\rho_{cp} = \rho_1 a_{v1}/100 + \rho_2 a_{v2}/100 \dots + \rho_n a_{vn}/100 ;$$

$$\rho_{cp} = 100/(a_1/\rho_1 + a_2/\rho_2 + a_3/\rho_3 + \dots + a_n/\rho_n),$$

где  $a_{vi}$  - состав древесного сырья по породам в объёмных процентах;  
 $a_i$  - состав древесного сырья по породам в массовых процентах.

Таблица 3

**Насыпная плотность резаной стружки из берёзы**

Абсолютная влажность, %	4	40	60	80	100	120	140
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	100	110	125	140	155	180	200

Среднюю плотность основных пород древесины при разной абсолютной влажности можно принять по табл. 4 [1].

Насыпную плотность других видов измельчённой древесины приближённо можно принять по табл. 5 [1].

Таблица 4

**Плотность различных пород древесины, кг/м<sup>3</sup>**

Абсолютная влажность, %	Порода древесины									
	Береза	Бук	Дуб	Ель	Липа	Листвен - ница	Осина	Пихта	Сосна	Тополь
0	600	640	650	420	470	630	470	350	470	430
5	610	650	660	430	480	640	480	360	480	440
10	630	670	680	440	490	660	490	370	500	450
15	640	680	700	450	500	670	500	380	510	460
20	650	690	720	460	510	690	510	390	520	470
25	670	710	740	470	530	700	530	400	540	480
30	680	720	760	490	540	710	540	410	550	500
40	730	780	820	520	580	770	580	440	590	540
50	790	830	870	560	620	820	620	470	640	570
60	840	890	930	600	660	880	660	510	680	610
70	890	950	990	640	710	930	710	540	720	650
80	940	1000	1050	670	750	990	750	570	760	690
90	1000	1060	1110	710	790	1040	790	600	810	730
100	1050	1110	1160	750	830	1100	830	630	830	760
120	1150	1200	1250				900		920	

Таблица 5

**Насыпная плотность измельчённой древесины**

Вид измельчённой древесины	Абсолютная влажность, %	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
Технологическая щепа хвойных пород	70	260
	90 - 100	300
	120	360
Резаная стружка от станков с ножевым валом (ДС-6 и др.)	80	150 - 200
	3 - 4	80 - 120
Специально изготовленные древесные частицы от станков ДС-5, ДС-7	80	110 - 150
	3 - 4	80 - 120
Мелкие древесные частицы от мельниц (сухие)	3 - 4	80 - 120
	3 - 4	120 - 180
Микростружка сухая	3 - 4	140 - 150
Технологическая пыль от специальной резаной стружки	3 - 4	150 - 180
Шлифовальная пыль	80	150 - 200
Опилки от лесопильных рам	3 - 4	15 - 40
Волокно древесное (сухое)	3 - 5	80 - 100
Стружка - отходы от дерзвододелочных станков	3 - 5	80 - 100
Волокнистые частицы из специальной резаной стружки (сухие)		80 - 130

Теплоёмкость древесины зависит от влажности и температуры древесины и почти не зависит от породы (табл.6) [2].

Таблица 6

**Теплоёмкость древесины**

Абсолютная влажность, %	Теплоёмкость при температуре t °С, кДж/(кг·К)					
	0	20	40	60	80	100
0	1,6	1,70	1,75	1,78	1,85	1,90
10	1,83	1,95	2,0	2,05	2,20	2,25
20	2,06	2,20	2,22	2,35	2,40	2,50
30	2,26	2,40	2,48	2,60	2,65	2,75
40	2,40	2,55	2,63	2,72	2,80	2,95
50	2,56	2,65	2,75	2,85	2,95	3,07
60	2,64	2,75	2,84	2,96	3,08	3,20
70	2,75	2,85	2,97	3,08	3,18	3,30
80	2,82	2,96	3,06	3,17	3,28	3,40
90	2,95	3,05	3,15	3,24	3,39	3,48
100	3,0	3,12	3,21	3,32	3,45	3,52
120	3,14	3,22	3,33	3,44	3,55	3,63

Теплопроводность различных пород древесины в направлении, перпендикулярном длине волокон ( $\lambda_{\perp}$ ), в зависимости от влажности приведена в табл.7 ( $\lambda$  – теплопроводность вдоль волокон).

Таблица 7

**Теплопроводность древесины**

Абсолютная влажность, %	Теплопроводность перпендикулярно волокнам, $\lambda_{\perp}$ , Вт/(м·К)					
	Берёза	Бук	Дуб	Сосна	Ель	Осина
0	0,180	0,154	0,215	0,128	0,110	0,093
20	0,209	0,180	0,250	0,145	0,122	
40	0,256	0,221	0,297	0,180	0,157	
60	0,308	0,268	0,354	0,220	0,198	
80	0,372	0,320	0,412	0,275	0,250	
100	0,430	0,378	0,470	0,337	0,308	
120	0,475	0,430	0,518	0,392	0,366	
$\lambda_{\perp}$	2,6	2,2	2,5	3,15	2,0	

**Характер процесса сушки измельчённой древесины**

При сушке измельчённой древесины с размером частиц более 0,5 мм наблюдаются, как и при сушке крупномерной древесины, два периода сушки: период постоянной скорости сушки и период убывающей скорости сушки. Исследованиями, проведёнными в УкрНИИМОД, установлено, что при сушке частиц размером менее 0,5 мм и стружки толщиной менее 0,5 мм наблюдается только первый период сушки.

**Основные характеристики псевдооживленного слоя**

Эквивалентный диаметр частиц нешарообразной формы:

$$d_s = (6V_q/\pi)^{0,33}, \quad (1)$$

где  $V_q$  – объём частицы, м<sup>3</sup>;

для частиц толщиной  $\delta$ , шириной  $b$  и длиной  $l$ :

объём -  $V_q = \delta b l$ ,

поверхность -  $F_q = 2(\delta b + \delta l + b l)$ .

Фактор формы:

$$\Phi = F_{ш} / F_q = 4,836 V_q^{0,67} / F_q, \quad (2)$$

где  $F_{ш}$  - поверхность шарообразной частицы, имеющей тот же объём, что и рассматриваемая частица с поверхностью  $F_q$ . В уравнении (2)  $F_{ш}$  выражена через  $d_s$ , по формуле (1).

Геометрический коэффициент формы:  $f = 0,207 F_q / V_q^{0,67}$ .

Фактор формы и геометрический коэффициент формы зависят от материала и формы частиц, значения  $\Phi$  и  $f$  приведены в табл. 8.

Таблица 8

Фактор и геометрический коэффициент формы

Форма частиц	Ф	f
Шарообразные	1	1
Кубические	0,83	1,212
Угловатые	0,83 – 0,87	1,15 – 1,20
Тонкие пластинки	0,48 – 0,53	1,9 – 2,1

Порозность – объёмная доля пустот в слое сыпучего материала:

$$\varepsilon = V_0/V = (V - V_s)/V,$$

где  $V_0$  - объём пустот в слое сыпучего материала,  $m^3$ ;

$V_s$  - объём, занятый твёрдыми частицами,  $m^3$ ;

$V$  - общий объём слоя,  $m^3$ .

ХАРАКТЕРИСТИКА СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Сушка, как и выпаривание, является сравнительно дорогой операцией, потому что на испарение 1 кг влаги необходимо подвести 2100 - 2500 кДж тепла.

Для сушки измельченной древесины используют сушильные установки непрерывного действия, в которых процесс сушки совмещается с перемещением материала. (рис. 1\*). Влажный материал из бункера-питателя БП шлюзовым дозатором ДШ подается в сушилку СБ. Сушильный агент - топочные газы, разбавленные воздухом, также поступает в сушилку из топки. Высушенный продукт выгружают из сушилки по-разному в зависимости от вида продукта и конструкции сушилки. Продукт (измельченная древесина) вместе с сушильным агентом отсасывается вентилятором-дымососом ВД в циклон-разгрузитель ЦР, где продукт отделяется от сушильного агента. Продукт через шлюзовой затвор ЗШ подается в транспортер ТВ, а отработанный сушильный агент выбрасывается в атмосферу через дымовую трубу ДТ.

Основные узлы сушильной установки (см. рис.1): топка, сушилка, узел загрузки влажного материала в сушилку, узел выгрузки высушенного материала из сушилки, подогреватель мазута и вентиляционное оборудование.

Узел загрузки влажного материала включает транспортер, бункер-питатель, дозатор и питатель. Расчет и выбор этого оборудования приведены в руководстве [3].

\* Рисунки оформлены в соответствии с требованиями, предъявляемыми к курсовому и дипломному проектированию (ГОСТ 7.32-81).

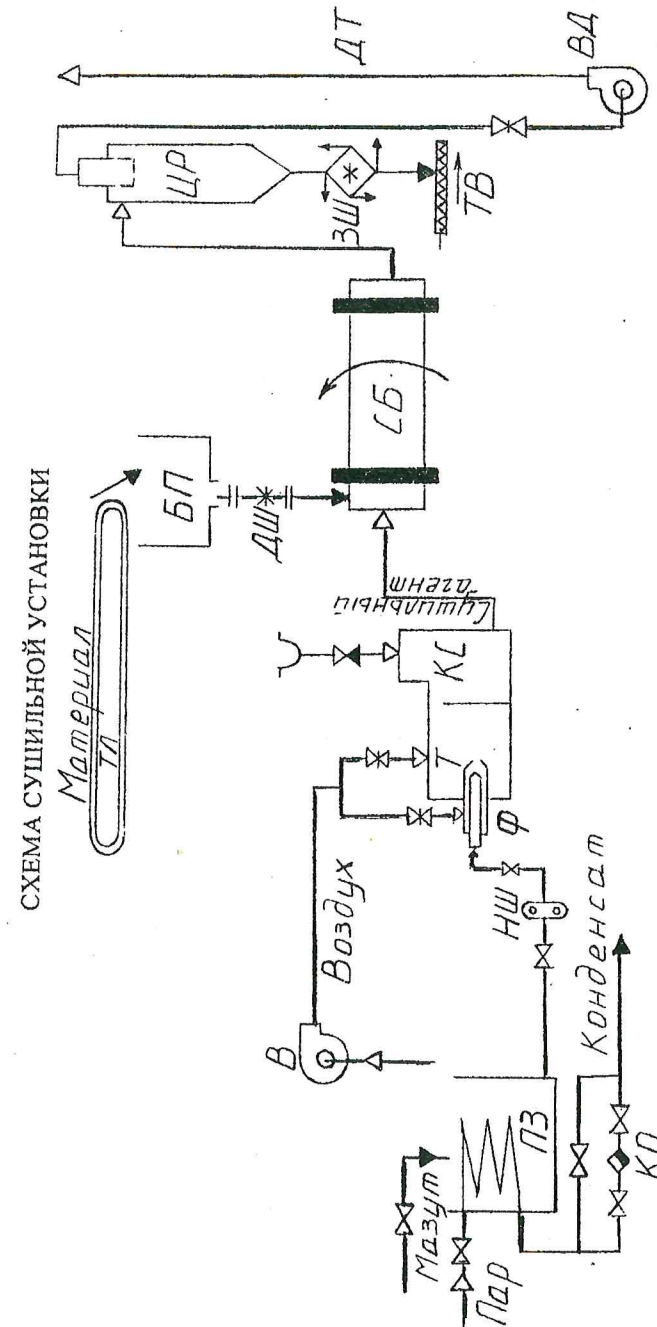


Рис.1  
ПЗ-подогреватель мазута; ВД-вентилятор-дымосос; ДТ-дымовая труба; Ф-форсунка; НШ-насос шестеренчатый; КО-конденсатор; ТВ-транспортер винтовой; ЦР-циклон разгрузочный; ЗШ-затвор шлюзовый; В-вентилятор; СБ-сушильный барабан; БП-бункер-питатель; ДШ-дозатор шлюзовый; Т-топка; КС-камера смешения; СБ-сушильный барабан; ТЛ-транспортер ленточный; Т-топка; КС-камера смешения; СБ-сушильный барабан; БП-бункер-питатель; ДШ-дозатор шлюзовый; ЦР-циклон разгрузочный; ЗШ-затвор шлюзовый; В-вентилятор; ВД-вентилятор-дымосос; ДТ-дымовая труба; Ф-форсунка; НШ-насос шестеренчатый; КО-конденсатор; ТВ-транспортер винтовой

**Узел выгрузки** высушенного материала состоит из бункера, циклона, пылевого затвора, транспортера. Их расчет и выбор, а также расчет змеевикового подогревателя см. в [3]. Расчет и выбор вентиляторов приведены в методиках [4,5].

**Топка.** В качестве сушильного агента в сушилках используют топочные газы, полученные при сжигании мазута или природного газа в топке. Расчет топок приведен в методике [6]. Топка (рис.2) выполняется в металлической кожухе 1 с теплоизоляцией 2 из листовой стали толщиной 8 - 10 мм. Внутри на подставках установлена труба 3 из стали, футерованная изнутри огнеупорным кирпичом и служащая топочной камерой. В кольцевой зазор ( $\delta=120 - 150$  мм) поступает наружный воздух по трубе 8 для охлаждения топки и разбавления топочных газов в камере смешения 4 до температуры  $t_1$ . Продукты горения ( топочные газы ) выходят из топки 3 через решетку 5 из огнеупорного кирпича, играющую роль катализатора при дожигании горючей смеси. На передней стороне топки размещены форсунка 6 и труба 7 с заслонкой для подачи наружного воздуха в топку с целью поддержания температуры горения не выше  $1000^\circ\text{C}$ , чтобы сохранить футеровку топки.

**Сушилка.** Выбор способа сушки измельченной древесины и конструкции сушилки определяется размерами и однородностью материала. Целесообразно технологическую стружку или щепу сушить в барабанных или аэрофонтанных сушилках, а также в комбинированных установках: аэрофонтанной и барабанной, аэрофонтанной и пневматической, пневматической и барабанной. Сушку волокна также проводят в две ступени: пневматическая - пневматическая; аэрофонтанная и пневматическая. Древесный опил сушат в сушилках: КС (кипящего слоя), пневматической, аэрофонтанной, барабанной и в любых комбинациях сушилок.

**Барабанные сушилки** типа БН (рис.3) предназначены для сушки различных взрыво- и пожаробезопасных нетоксичных сыпучих (кусковых и зернистых) продуктов [7]. Вращающийся барабан 1 установлен на роликовых опорах 3,6 с наклоном (рис.4.) Привод барабана 5 включает электродвигатель, редуктор и зубчатую передачу 4. В начальной по ходу продукта зоне барабана установлена приемно-винтовая насадка (в этой зоне продукт, перемещаясь, предварительно подсушивается), за ней – лопастная (для равномерного распределения и перемешивания материала при вращении барабана по его сечению с целью обеспечения развитой поверхности контакта с сушильным агентом) и комбинированная лопастно-секторная (рис.5). В комплект барабанной сушилки входят камеры загрузки и выгрузки (рис.6 и 7). Герметизация вращающегося барабана с неподвижными камерами осуществляется через уплотнительное устройство 7 (рис.8,9).

Технические характеристики барабанных сушилок типа БН приведены в табл.9. В табл. 10 даны размеры штуцеров барабанной сушилки.

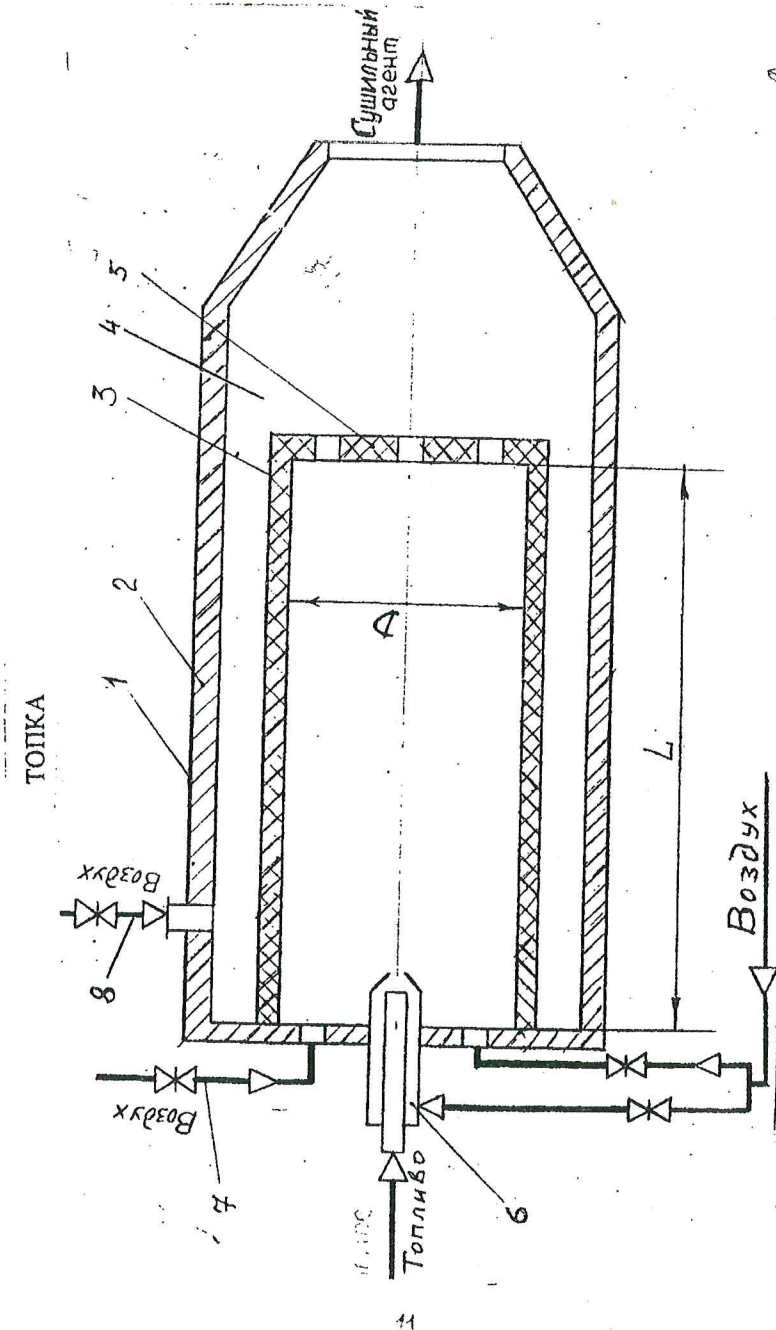


Рис.2

1-металлический кожух; 2-теплоизоляция; 3-топочная камера; 4-камера смешения; 5-решетка; 6-форсунка; 7-подача воздуха для снижения температуры в топочной камере; 8-подача воздуха на разбавление

БАРАБАНАЯ СУШИЛКА

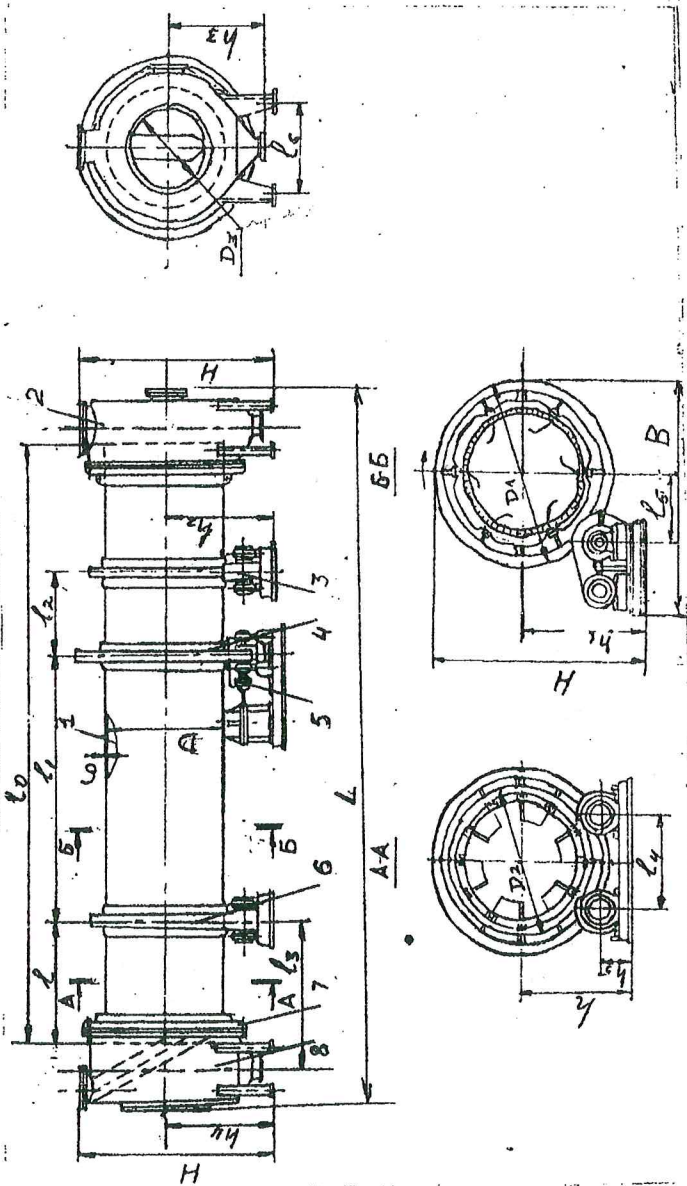


Рис.3  
1-барабан; 2-камера разгрузочная; 3-станция опорная; 4-венцы зубчатый; 5-привод сушилки; 6-станция опорная; 7-устройства уплотнительные; 8-камера загрузочная

СХЕМА УСТАНОВКИ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА С УЧЕТОМ ЕГО НАКЛОНА К ГОРИЗОНТУ

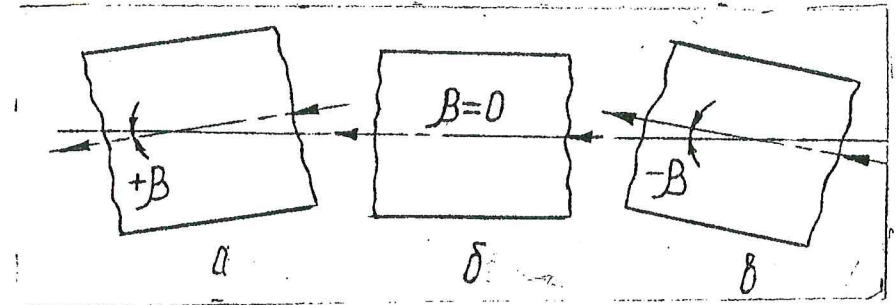


Рис.4  
а)  $\beta=+3^\circ$ ; б)  $\beta=0$ ; в)  $\beta$  от  $-1^\circ$  до  $-3^\circ$

ВНУТРЕННИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ НАСАДКИ

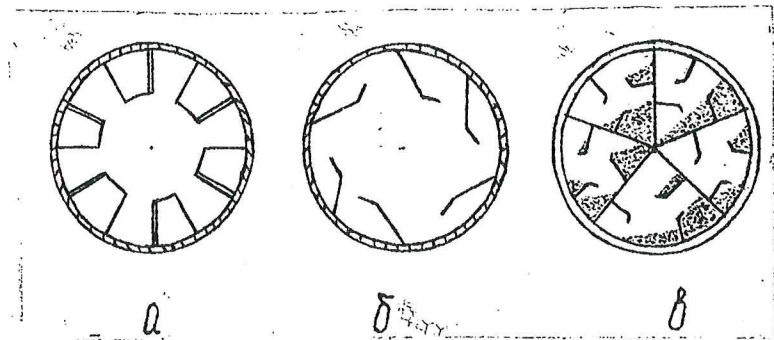


Рис.5  
а) приемно-винтовая; б) лопастная; в) секторная

ЗАГРУЗОЧНАЯ КАМЕРА ДЛЯ СУШИЛОК

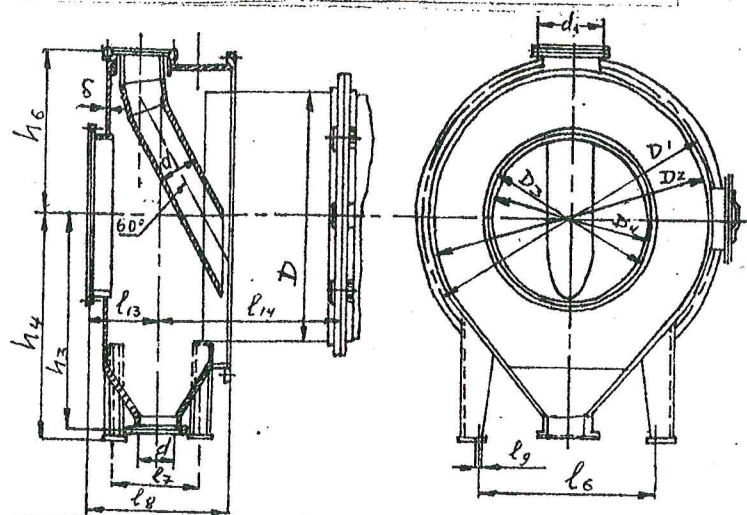


Рис.6

РАЗГРУЗОЧНАЯ КАМЕРА ДЛЯ СУШИЛОК

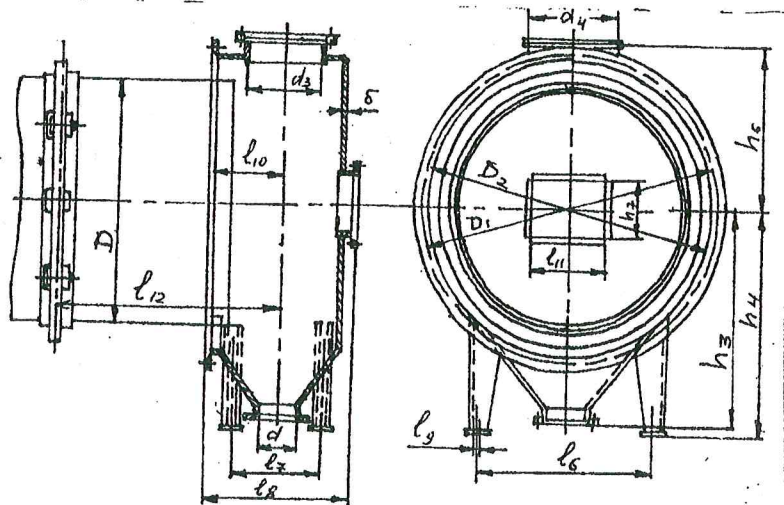


Рис.7

СХЕМА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ БАРАБАННОЙ СУШИЛКИ

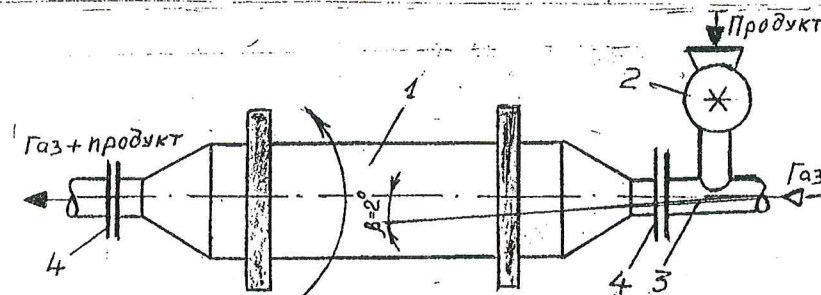


Рис.8

1-вращающийся барабан; 2-шлюзовый дозатор; 3-газоход; 4-торцевые плавающие уплотнения

ТОРЦЕВОЕ ПЛАВАЮЩЕЕ УПЛОТНЕНИЕ

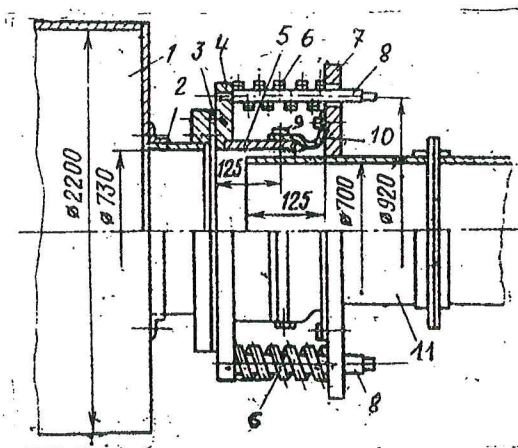


Рис.9

1-сушильный барабан; 2-фланец; 3-латунное кольцо; 4-плавающий фланец; 5-отрезок трубы; 6-пружина; 7-плавающее кольцо; 8-пальцы; 9-кольцевой обод; 10-асбестовая ткань; 11-неподвижный газоход



Таблица 9

Технические характеристики барабанной сушилки типа БН

Тип	D, м	l <sub>0</sub> , м	ρ, с	N, кВт	Основные размеры, мм				
					L	B	H	h	
БН0,5-2,5НУ-01	0,5	25	0,077	0,75	4185	1155	1280	1500	708
БН1-4НУ-02	1,0	4	0,068	3,8	5230	2185	1960	2300	967
БН1-6НУ-01	1,0	6	0,085	6,0	7230	2185	1960	3500	967
БН1,2-6НУ-01	1,2	6	0,135	4,8	7260	2480	2215	3500	1160
БН1,2-8НУ-02	1,2	8		5,7	9260	2480	2215	4700	1160
БН1,6-8НУ02	1,6	8	0,053	13,2	9480	2860	3255	4700	1453
БН1,6-10НУ03	1,6	10		16,4	11480	2860	3255	5900	1453
БН2-8НУ-03	2,0	8	0,072	17,9	9820	3770	3485	4700	1783
БН2-10НУ-03	2,0	10	0,107	19,9	11820	3770	3485	5900	1783
БН2,2-10НУ-03	2,2	10	0,0330	24	11985	3885	3585	5900	1892
БН2,2-14НУ-03	2,2	14		26	15985	3885	3585	8200	1892
БН2,5-14НУ-03	2,5	14	0,05	24	14015	4550	4220	8200	2360
БН2,8-14НУ-03	2,5	14		37,5	14012	4550	4220	8200	2360
БН2,8-16НУ-03	2,8	16	0,067	55	16012	5145	4636	9300	2530
БН2,8-20НУ-03	2,8	20		72	20000	5145	4636	11700	2530
БН3-18НУ-03	3,0	18	0,067	62,5	18000	5800	5100	10000	2780
БН3-20НУ-03	3,0	20	0,1	75	20000	5800	5100	12000	2780
БН3,2-22НУ-03	3,2	22	0,0330	100	22000	6200	5450	13000	2927
БН3,5-27НУ-05	3,5	27		200	27000	6825	7400	17000	3214

Таблица 10

Размеры штуцеров, мм

D, м	Продукт		Сушильный агент	
	Вход	Выход	Вход	Выход
0,5	100	100 × 100	100 × 240	125
1,0	170	200 × 200	600	400
1,2	225	250 × 250	750	450
1,6	325	300 × 300	1050	550
2,0	450	400 × 400	1335	635
2,2 - 3,5	450	400 × 400	1500	635

**Условные обозначения сушилок**

Первые две буквы - барабанная вращающаяся сушилка с насадкой; первое число - диаметр барабана, м; второе число - длина барабана, м; следующие две буквы - исполнение по взрывозащищенности и группа материалов деталей, соприкасающихся с продуктом; последнее число - модель сушилки.

**Пример условного обозначения:** Сушилка БН 1,2-10НУ-02, где - БН - барабанная вращающаяся атмосферная сушилка с секторной насадкой диаметром 1,2 м, с барабаном длиной 10 м, в невзрывозащищенном исполнении (Н), с узлами и деталями, соприкасающимися с продуктом из углеродистой стали (У), модель исполнения - 2.

**МОДЕРНИЗАЦИЯ БАРАБАННОЙ СУШИЛКИ**

С целью интенсификации процесса сушки по предложению ЦНИИФ [2] была реконструирована барабанная сушилка для сушки измельченной древесины (рис.8).

1. Если обычно угол наклона барабана β = +3°, то ЦНИИФ рекомендовал β от -1 до -3° (см. рис.4.) Применение барабанов с отрицательным углом наклона повышает коэффициент заполнения барабана высушиваемым материалом на 18 - 35%, увеличивает продолжительность сушки, позволяет повысить температуру сушильного агента на входе в барабан t<sub>1</sub>, не опасаясь загорания.

2. Увеличена частота вращения барабана с 3 до 6 - 8 об./мин.

3. Изменен способ ввода в барабан и отбора древесных частиц (см. рис.8). Влажный материал с помощью шлюзового дозатора ДШ загружается в газодод, где захватывается сушильным агентом и направляется в барабан, в котором удалены загрузочная и разгрузочная камеры. Чтобы материал не выносился из сушильного барабана сырым, количество сушильного агента должно быть не более 7,0 - 8,3 кг/с. Скорость прохождения материала через барабан определяется величиной его наклона к горизонту (уг-

лом  $\beta$ ), частотой вращения барабана  $n$  и массовой скоростью движения сушильного агента  $\rho_w$ .

4. Ввиду трудностей герметизации вращающегося барабана с неподвижными камерами или газоходами было разработано и внедрено плавающее торцевое уплотнение (см. рис.9). Сушильный барабан 1 вращается вместе с фланцем 2. К торцу фланца на болтах прикреплено латунное кольцо 3. На неподвижном газоходе 11, по которому подается сушильный агент с влажным материалом, укреплено направляющее кольцо 7. Через это кольцо проходят пальцы 8, ввернутые в плавающий фланец 4. К этому фланцу прикреплен отрезок трубы 5. Пружинами 6, насаженными на пальцы 8, плавающий фланец 4 прижимается к латунному кольцу фланца 2, вращающегося вместе в барабаном 1. Для предотвращения подсоса воздуха через зазоры между трубами 5 и 11 кольцевыми ободами 9 к трубам 5 и кольцу 7 болтами крепится асбестовая ткань 10.

При сушке измельченной древесины пожароопасной температурой сушильного агента на выходе из барабана является температура  $t_2 = 150 - 160^\circ\text{C}$ . Экспериментальные значения температуры сушильного агента  $t_1$  в зависимости от абсолютной начальной влажности при температуре  $t_2$  в пределах от  $90$  до  $120^\circ\text{C}$ , что ниже пожароопасного уровня, приведены в табл. 11 [2].

Таблица 11

Режим сушки измельченной древесины в барабанной сушилке

Показатели	Абсолютная начальная влажность, $\omega_{a1}$ , %				
	40	60	80	100	120
Температура сушильного агента, $^\circ\text{C}$ : - на входе в сушилку, $t_1$ - на выходе из сушилки, $t_2$	230 - 350	270 - 400	300 - 450	350 - 500	370 - 550
Температура материала на выходе из сушилки, $\theta_{2(\max)}$ , $^\circ\text{C}$	55 - 60				
Напряжение по влаге, $A$ , $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$	(17 - 30) - сушилка с загрузочной и разгрузочной камерами; (40 - 50) - сушилка без камер				

Широкое распространение барабанных сушилок обусловлено сравнительно высокой их интенсивностью и возможностью применения для крупнотоннажных производств. Основными недостатками этих сушилок являются истирание материала, громоздкость и большие капитальные затраты на их сооружение.

Сушилки кипящего слоя (КС) (рис.10) применяют в основном для сушки опила и для проведения первой стадии сушки измельченной древесины до влажности 15 - 20% с последующей досушкой в сушилках других типов.

По конструкции различают сушилки КС однокамерные, многоступенчатые (многокамерные) с перекрестным током сушильного агента, многоступенчатые противоточные, сушилки с механическими побудителями и измельчением высушиваемого материала. Сушилки КС делают цилиндрическими и прямоугольными.

Недостатком однокамерной сушилки КС является смешивание поступающего материала с выходящим, а отсюда неравномерная сушка - просок недовысушенного материала в готовый продукт. Однако усреднение влажности продукта происходит во время хранения его на складе или за счет применения многокамерных сушилок.

Техническая характеристика сушилки КС [8]

Производительность сушилки КС 300 - 600  $\text{кг}/\text{ч}$ , так как при увеличении площади решетки не удается устранить нежелательный режим сушки каналообразования.

Решетка - беспровальная колпачковая с живым сечением 15 - 17 % при  $t_1 = 200 - 250^\circ\text{C}$ .

Температура сушильного агента на входе в сушилку,  $t_1$ ,  $^\circ\text{C}$ .....150 - 225

Порозность для нормального режима псевдоожижения,  $\epsilon$ .....0,50 - 0,75

Рабочая скорость псевдоожижения для опила,  $w$ ,  $\text{м}/\text{с}$ .....1 - 1,12

Абсолютная влажность материала, %:

$\omega_{a1}$ .....40 - 50

$\omega_{a2}$ .....5 - 9

Высота слоя,  $H_{\text{нс}}$ ,  $\text{мм}$ .....300 - 600

Объемный коэффициент теплоотдачи,  $\alpha$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ .....500 - 11000

Напряжение по влаге,  $A$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .....150 - 200.

Основные параметры и размеры сушилок КС приведены в табл.12.

Пневматическая труба-сушилка применяется для сушки опила, стружки, щепы и волокна. Сушка происходит в горизонтальной или вертикальной трубе. Эти сушилки используют как первую стадию сушки с досушкой в других сушилках. В зависимости от продолжительности сушки и длины трубы-сушилки сушильный аппарат может иметь одну или несколько последовательно или параллельно соединенных вертикальных труб. Конструкция трубы-сушилки показана на рис. 11.

Горизонтальная труба-сушилка представляет собой пневмотранспортер, в котором одновременно протекает и процесс сушки древесных частиц;

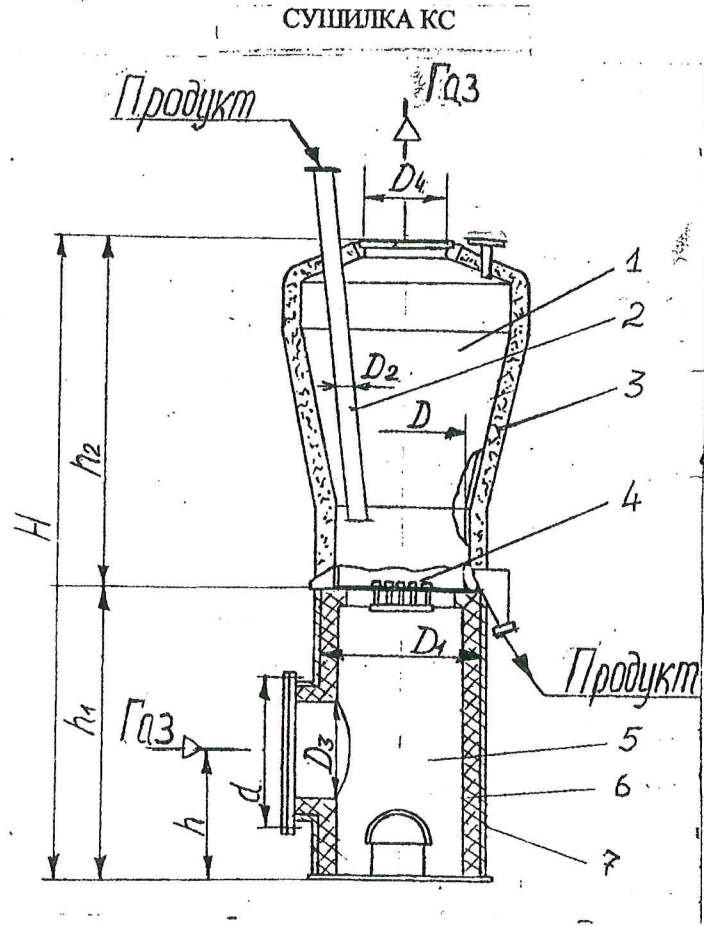


Рис.10

1-рабочая камера; 2-труба подачи продукта; 3-теплоизоляция; 4-опорно-распределительная решетка; 5-газораспределительная камера; 6-футеровка; 7-корпус

Таблица 12  
Основные параметры, габаритные и присоединительные размеры сушилок КС

Условные обозначения* сушилок	Площадь поверхности опорности опорно-распределительной решетки, м <sup>2</sup>	Основные размеры, мм						Габаритные размеры			
		D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	h	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	L	B	H
КС-1,1-1	1	1100	1856	800	1000	1500	3032	4250	2500	2300	7280
КС-1,6-2	2	1600	2320	1160	1200	1800	3960	5000	3300	3300	8960
КС-2,3-4	4	2300	3036	1500	1600	2250	4670	6220	4500	3550	10900
КС-2,8-6	6	2800	3384	1850	1600	2850	6052	6760	5500	4200	12820
КС-3,2-8	8	3200	3732	2320	1600	2850	6532	7710	5600	4720	14250
КС-3,6-10	10	3600	4196	2550	1800	2850	7228	8360	7100	5250	15600

\* Первые две буквы – сушилка КС;  
 первое число – диаметр сушилки, м;  
 второе число – площадь поверхности опорно-распределительной решетки, м<sup>2</sup>.  
 Например, КС-2,3-4: КС – сушилка кипящего слоя; диаметр сушилки - 2,3 м; площадь решетки - 4м<sup>2</sup>

ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ ТРУБА-СУШИЛКА

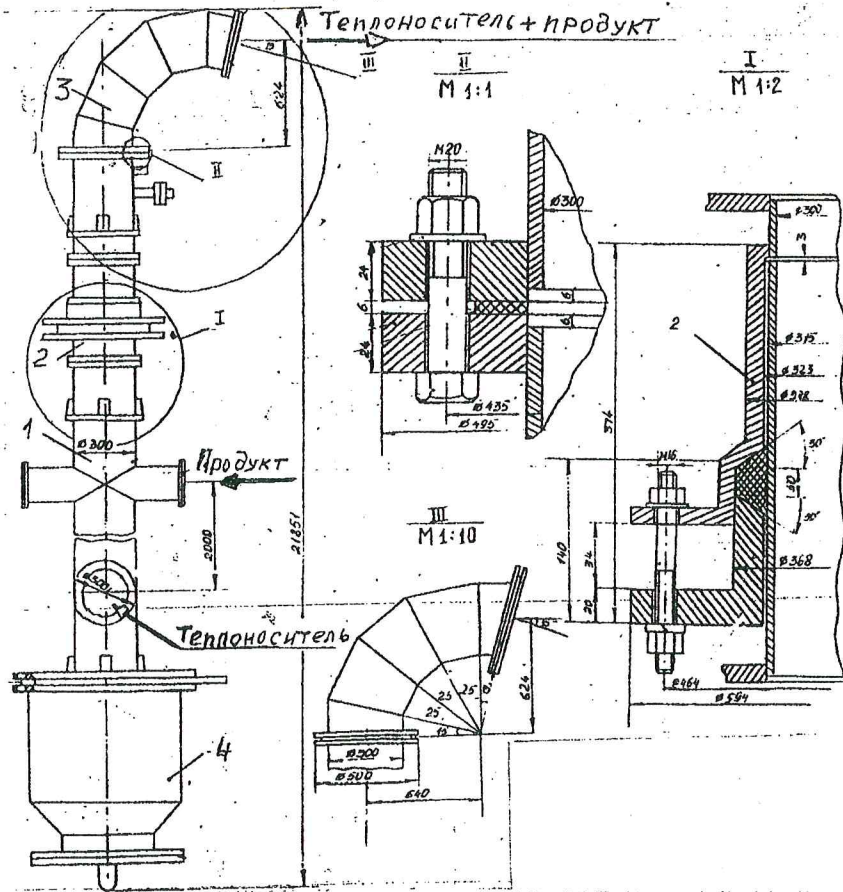


Рис.11

1-труба-сушилка; 2-компенсатор; 3-патрубок; 4-бункер провала

применяется как первая ступень сушки в сочетании с барабанной или аэрофонтанной сушилкой.

*Техническая характеристика пневматической трубы-сушилки [8]*

Производительность,  $G_1$ , кг/ч:

щепы.....	1000
стружка, опил.....	1100

Абсолютная влажность, %:

$\omega_{a1}$ .....	110 - 60
$\omega_{a2}$ .....	65 - 20

Температура сушильного агента,  $t_1$ , °C.....400 - 650

Скорость сушильного агента,  $w_r$ , м/с:

для опила.....	8 - 10
для стружки, щепы.....	10 - 12

Концентрация материала в сушильном агенте,  $\bar{Y}$ , кг/кг .....0,37 - 0,8

Напряжение по влаге,  $A$ , кг/(м<sup>3</sup>·ч).....50 - 250

Объемный коэффициент теплоотдачи,  $\alpha_v$ , Вт/(м<sup>3</sup>·К).....320 - 840

Удельный расход тепла,  $q_v$ , кДж/кг.....3000 - 4500.

Труба-сушилка особенно эффективна для удаления поверхностной влаги (первый период сушки), так как материал и сушильный агент движутся в одном направлении (прямоток). Вследствие кратковременности сушки допустимы повышенные до 800°C температуры сушильного агента даже для термочувствительных продуктов.

**Аэрофонтанные сушилки** используют для сушки измельченной древесины (опила, щепы) в комбинации с трубой-сушилкой и барабанной сушилкой. Основной частью аэрофонтанной сушилки (рис.12) является диффузор - полый сосуд в форме усеченного конуса, обращенный широкой частью вверх. Влажный материал из бункера 1 подается шлюзовым дозатором 2 в горизонтальный газоход и переносится сушильным агентом в сушилку 4 через горловину 3. Следствием конусности является интенсивная циркуляция материала, он поднимается, фонтанирует в центральной части конуса и опускается в ее периферийной части. Высушенные частицы, когда их скорость витания становится меньше скорости газа  $w_{12}$  в верхней части конуса; уносятся потоком газа пневмотранспортом в циклон для улавливания.

Исследования показали, что в циклонах эффективно продолжается сушка. Продолжительность сушки в аэрофонтанной сушилке значительно больше, чем в трубе-сушилке, и ее трудно регулировать. Кроме того, сушка протекает несколько неравномерно и возможен перегрев материала.

*Техническая характеристика аэрофонтанной сушилки [8]*

Производительность,  $G_1$ , кг/ч.....200 - 900

Абсолютная влажность материала, %:

$\omega_{a1}$ .....	50 – 70
$\omega_{a2}$ .....	5 – 25
Температура сушильного агента $t_1$ , °C.....	150 – 250
Скорость газа в горловине, не менее, м/с:	
для опила, $w_{r1}$ .....	8 – 10
для щепы, $w_{r2}$ .....	10 – 12
Концентрация материала в сушильном агенте, не более, $\bar{V}$ , кг/кг.....	0,1
Напряжение по влаге $A$ , кг/(м <sup>3</sup> ч).....	80 – 180

Аэрофонтанные сушилки могут оказаться рентабельнее сушилок КС при сушке однородных по крупности частиц материала в условиях большой начальной влажности, так как они проще устроены и дешевле.

**АЭРОФОНТАННАЯ СУШИЛКА**

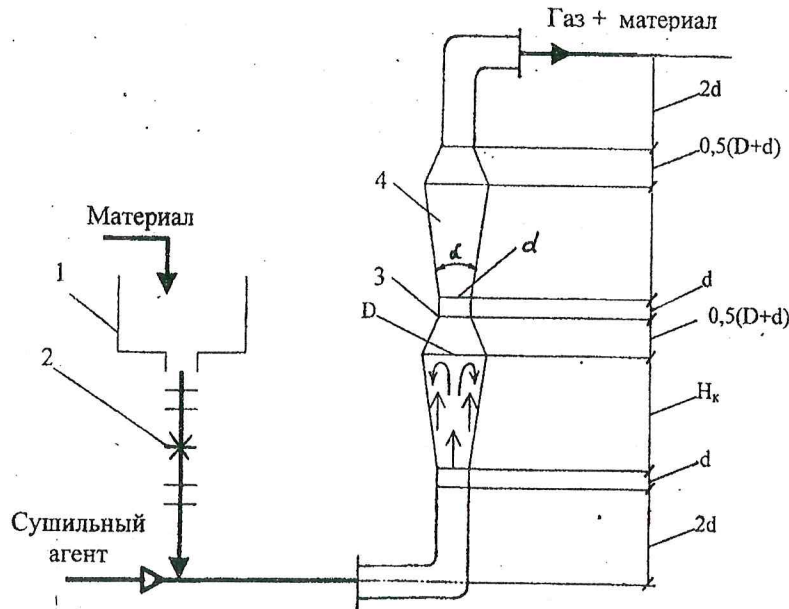


Рис.12

1-бункер;2-дозатор шлюзовый;3-горловина;4-конус(рюмка)

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СУШИЛОК**

*Цель технологического расчета* – определение материальных потоков, количества испаряемой влаги (материальный баланс), количества тепла, затрачиваемого на проведение процесса сушки (тепловой баланс) и расхода сушильного агента.

**МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС**

*Взаимосвязь между абсолютной и относительной влажностью материала:*

$$\omega_a = 100\omega_o / (100 - \omega_o);$$

$$\omega_o = 100\omega_a / (100 + \omega_a).$$

Критическая относительная влажность  $\omega_{кр}$  древесных частиц может быть принята в пределах от 20 до 26%.

*Материальный баланс:*

по потоку  $\bar{G}_1 = \bar{G}_2 + W;$

по влаге  $\bar{G}_1\omega_{o1}/100 = \bar{G}_2\omega_{o1}/100 + W;$

по абсолютно сухому материалу

$$\bar{G}_a = \bar{G}_1(100 - \omega_{o1})/100 = \bar{G}_2(100 - \omega_{o2})/100.$$

Совместное решение уравнений материального баланса:

$$\bar{G}_1/(100 - \omega_{o2}) = \bar{G}_2/(100 - \omega_{o1}) = W/(\omega_{o1} - \omega_{o2}).$$

**ПОСТРОЕНИЕ РАБОЧЕЙ ЛИНИИ ПРОЦЕССА СУШКИ НА I-x ДИАГРАММЕ**

Исследованиями, проведенными УкрНИИМОД [2], установлено, что при сушке древесных частиц менее 0,5 мм и стружки толщиной менее 0,5 мм наблюдается только первый период сушки. Для древесных частиц размером более 0,5 мм расчет проводится также только для первого периода сушки из-за отсутствия надежных расчетных уравнений. При испарении поверхностной влаги температура высушенного материала  $\theta_2$  принимается приблизительно равной температуре мокрого термометра ( $\theta_2 = t_{m1}$ ) при параметрах сушильного агента на входе в сушилку ( $x_1, t_1, I_1$ ). В первом приближении процесс сушки принимается адиабатическим ( $I_1 = I_2$ ). Чем больше влажность высушиваемого материала, тем ближе температура материала  $\theta_2$  к температуре мокрого термометра  $t_{m1}$ .

*Цель построений рабочей линии процесса сушки на I-x диаграмме* - графическое определение температуры материала на выходе из сушилки  $\theta_2$  и параметров сушильного агента  $x_2$  и  $I_2$ .

*Теплосодержание наружного воздуха:*  $I_0 = 1,01t_0 + (2493 + 1,97t_0)x_0.$

*Теплосодержание сушильного агента на входе в сушилку при  $x_1$  и  $t_1$ :*

$$I_{11} = 1,01t_1 + (2493 + 1,97t_1)x_1,$$

где значение влагосодержания  $x_1 = x''$  (см. расчет топок [6]).

*Последовательность построений на I-x диаграмме (рис.13,14):*

1. Строим точку А по координатам  $x_0$  и  $t_0$ .



2. Строим *точку К* по координатам  $x_{тр}$  и  $t_{тр}$ .

3. Соединяем *точки А и К*, линия  $\overline{AK}$  - рабочая линия процесса горения топлива.

4. Находим *точку В* по пересечению линии  $\overline{AK}$  с линией температур  $t_1$ , определяем  $x_1$ , сравниваем с расчетным значением  $x''$  [6].

5. Определяем *температуру материала на выходе из сушилки*  $\theta_2$  по  $t_{м1}$  для *точки В*, принимая  $I_1=I_2$ ; по пересечению линий теплосодержания  $J_1$  и относительной влажности при насыщении  $\phi = 100\%$ .

6. Из уравнения внутреннего теплового баланса сушилки  $\Delta = 4,19\theta_1 \cdot (q_m + q_{пот})$  определяем  $\Delta$  - разность между удельными приходами и расходами тепла непосредственно в сушилке в кДж/кг влаги.

*Удельный подвод тепла в сушилку с высушиваемым материалом*, кДж/кг влаги:  $q_{мат} = \bar{G}_2 C_2 (\theta_2 - \theta_1) / W$ ,

где  $C_2$  - теплоемкость материала, кДж/(кг·К) - см. табл.6.

*Удельные потери тепла*, по данным академика М.В.Лыкова,  $q_{пот} = 100 - 400$  кДж/кг влаги, и в зависимости от начальной влажности материала меньшее значение  $q_{пот}$  принимают для высоковлажных материалов.

7. *Уравнение рабочей линии сушки:*

$$\Delta = (I - I_1) / (x - x_1) \text{ или } I = I_1 + \Delta(x - x_1). \quad (3)$$

Для построения рабочей линии сушки необходимо знать координаты минимум двух точек. Координаты одной *точки В* ( $x_1$  и  $I_1$ ) известны. Для нахождения координат второй *точки Е* ( $x$ ,  $I$ ) задаемся произвольным значением  $x > x_1$  и определяем соответствующее значение  $I$  из формулы (3).

8. Строим *точку Е* по координатам  $x$  и  $I$ .

9. Проводим *рабочую линию процесса сушки*  $\overline{BC}$  через две точки на диаграмме  $I - x$  с координатами  $B(x_1$  и  $I_1)$  и  $E(x$  и  $I)$  до пересечения с заданной линией температуры  $t_2$  (*точка С*).

10. Находим на  $I - x$  диаграмме параметры отработанного сушильного агента в *точке С*:  $x_2$  и  $I_2$ .

#### ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

*Теплосодержание сушильного агента на выходе из сушилки при  $x_1$  и  $t_2$ :*  $I_{12} = 1,01t_2 + (2493 + 1,97t_2) x_1$ .

*Теплосодержание подсосываемого воздуха при  $t_0$  и  $x_0$ :*  $I_{n0} = I_0$ .

*Теплосодержание подсосываемого воздуха при  $t_2$  и  $x_0$ :*

$$I_{n2} = 1,01t_2 + (2493 + 1,97t_2) x_0.$$

*Расход тепла на испарение влаги:*  $Q_u = W(2493 + 1,97t_2 - 4,19\theta_1)$ .

*Расход тепла на нагревание материала:*  $Q_m = \bar{G}_2 C_m (\theta_2 - \theta_1)$ .

*Потери тепла в окружающую среду:*  $Q_{пот} = W q_{пот}$ .

*Расход тепла на проведение процесса сушки материала:*

$$Q_{общ} = Q_u + Q_m + Q_{пот}.$$

*Расход сушильного агента:*

$$L_1 = (Q_u + Q_m + Q_{пот}) / [(I_{11} - I_{12}) - 0,05(I_{n2} - I_{n0})].$$

*Количество парогазовой смеси, выходящей из сушилки:*

- сухих газов  $L_2 = L_1 + (0,05 - 0,15)L_1$ ;

- паров воды  $d_2 = L_1 x_1 + (0,05 - 0,15)L_1 x_0 + W$ .

*Влагосодержание сушильного агента (парогазовой смеси):*

- на выходе из сушилки:  $x_2 = d_2 / L_2$

- или из материального баланса по влаге с воздухом:

$$L_1 = W / (x_2 - x_1), \text{ откуда } x_2 = x_1 + W / L_1.$$

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СУШИЛОК

При проектировании сушилок задача состоит в определении оптимальных основных размеров (диаметра, длины или высоты рабочей части сушилки) для заданной производительности.

*Объемный расход сушильного агента:*

- на входе в сушилку  $Vt_1 = L_1(1 + x_1) / \rho_{11}$ ;

- на выходе из сушилки  $Vt_2 = L_2(1 + x_2) / \rho_{12}$ ,

где  $\rho_{11}$  и  $\rho_{12}$  - плотность сушильного агента (определяют по Прил. 2[5]).

## БАРАБАННАЯ СУШИЛКА

### ДИАМЕТР СУШИЛКИ

Зная производительность по абсолютно сухому материалу  $G_a$ , начальную и конечную влажность древесных частиц, а также температуру сушильного агента  $t_1$  на входе в сушилку, выбирают [2]:

- оптимальный угол наклона барабана ( $\beta_{опт}$  от  $-1^\circ$  до  $-3^\circ$ );

- оптимальную скорость вращения барабана ( $n_{опт} = 6 - 8$  об./мин);

- массовую скорость сушильного агента ( $\rho, w$ ) по рис.15 и по  $\beta$  и  $t_1$ ;

- диаметр сушильного барабана:  $D = [L_1 / 0,785(\rho, w)]^{0,5}$ ;

- стандартный диаметр барабана по каталогу [7] или по табл.9.

### ДЛИНА СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА

Расчет проводят по уравнению кинетики процесса сушки стружки (опила, щепы), полученному на основе исследований ЦНИИФ [2].

*Параметр  $\Pi$ :*  $\Pi = [(t_2 - 30) / (t_1 - t_2 + 10)]^{0,5}$ .

*Параметр  $M$ :*  $M = 3600 G_a / [\Pi(\rho, w) D^2 t_1^{0,425}]$ .

*Коэффициент заполнения сушильного барабана стружкой  $\psi$*  определяют по рис.16.

*Значение  $K^{0,34}$ :*  $K^{0,34} = [w_{a2} / (w_{a1}(w_{a1} - w_{a2}))]^{0,34}$ .

*Коэффициент  $A$*  зависит от угла наклона барабана (табл.13).

*Длина сушильного барабана:*

$$L^{0,39} = [M A^{0,34} d_3^{0,526} (\rho, w)^{0,136}] / [1360 \psi^{0,39} K^{0,34} D^{a1} \sin \beta^{a1} (n^2 / 1800)^a]. \quad (4)$$

ИЗМЕНЕНИЕ МАССОВОЙ СКОРОСТИ  $\rho_w$  В БАРАБАННОЙ СУШИЛКЕ

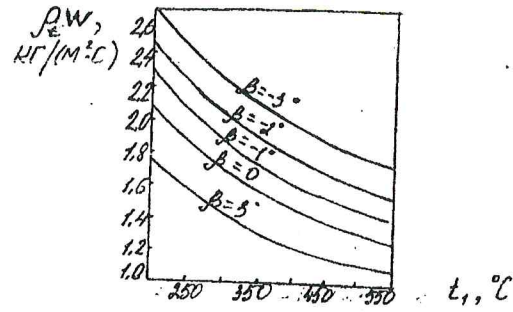


Рис.15

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ БАРАБАННОЙ СУШИЛКИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

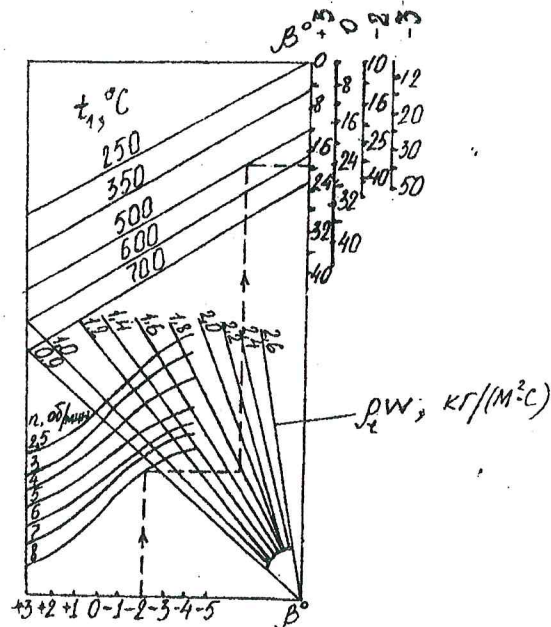


Рис.16

30

Таблица 13

Значения величин, входящих в формулу (4)

D, м	D <sup>al</sup> при β=+3	D <sup>al</sup> при β=0-(3)	t <sub>1</sub> , °C	ε <sub>23</sub> <sup>al</sup>	φ, %	φ <sup>0,39</sup>	l, м	l <sup>0,39</sup>	n, об/мин	(n <sup>2</sup> =1800) <sup>2</sup>		β	sin β	A <sup>0,34</sup>	mm <sup>2</sup> p	ρ <sub>0,26</sub> <sup>D</sup>	ρ <sub>w</sub> <sup>2</sup> (кг <sup>2</sup> /м <sup>2</sup> ·с)	ρ <sub>w</sub> <sup>2</sup> (кг <sup>2</sup> /м <sup>2</sup> ·с)
										при β=+3	при β=0-(3)							
1,2	1,01	1,02	200	9,55	5	1,87	6	2,02	2,5	0,83	0,57	+3	1	14,3	1	1,0	0,8	0,97
1,4	1,015	1,04	250	10,5	6	2,02	8	2,26	3,0	0,836	0,59	0	1	8,8	2	1,44	1,0	1,0
1,6	1,02	1,05	300	11,4	8	2,26	10	2,46	4,0	0,848	0,62	-1	0,41	6,0	3	1,78	1,2	1,02
1,8	1,025	1,06	350	12,0	10	2,46	12	2,63	5,0	0,862	0,65	-2	0,48	3,13	4	2,08	1,4	1,05
2,0	1,028	1,07	400	12,9	12	2,63	14	2,8	6,0	0,88	0,68	-3	0,52	1,4	5	2,33	1,6	1,065
2,2	1,03	1,08	450	13,4	14	2,8	16	2,96	7,0	0,886	0,7				6	2,58	1,8	1,08
2,5	1,04	1,1	500	14,3	16	2,96	18	3,1	8,0	0,892	0,72				7	2,78	2,0	1,1
3,0		1,12	550	14,7	18	3,1		3,21	9,0	0,898	0,78				8	3,0	2,2	1,11
3,5			600	15,0	20	3,23			10,0	0,905					9	3,18	2,4	1,13
4,0			650	15,9	25	3,5									10	3,36	2,6	1,15
				16,2	30	3,76									12		3,0	1,16
					35	3,99												
					40	4,25												
					45	4,5												



Значения всех величин, возводимых в степени в формуле (4), приведены в табл.13. По значению  $L^{0,39}$  находят длину сушильного барабана  $L$ . Если полученная длина барабана  $L$  не соответствует данным каталога [7], то ее корректируют подбором температуры  $t_2$  отработанного сушильного агента и пересчетом соответствующих позиций расчета. С повышением  $t_2$  уменьшается длина барабана. Расчет барабанных сушилок для сушки других материалов приведен в [9].

**ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА  $\Delta P_c$**

Пример расчета  $\Delta P_c$  сушильного барабана см. в [5, с.27].

**СУШИЛКА КС**

**ДИАМЕТР СУШИЛКИ КС**

**Критерий Архимеда:**

$$Ar = d^3 \rho_{\text{тср}} \rho_m g / \mu_{\text{тср}}^2 \quad (5)$$

где  $\rho_{\text{тср}}$ ,  $\mu_{\text{тср}}$  - плотность и динамическая вязкость сушильного агента при  $t_{\text{ср}}$  принимаются по Прил. 1 и 2 [5];

$\rho_m$  - плотность материала - по  $\omega_{\text{аср}}$  и по табл.3.

**Критерий  $Re_{\text{кр}}$** , соответствующий условиям начала псевдооживления:

$$Re_{\text{кр}} = Ar \Phi^2 / [(150(1 - \epsilon_0^3) / \epsilon_0^3) + (1,75 Ar / \epsilon_0^3)^{0,5}],$$

где  $\epsilon_0$  - порозность неподвижного слоя;  $\epsilon_0 = 0,38 - 0,42$  для шарообразных частиц одинакового диаметра.

**Скорость начала псевдооживления:**  $w_{\text{кр}} = Re_{\text{кр}} \mu_{\text{тср}} / d_3 \rho_{\text{тср}}$

**Верхний предел допустимой скорости сушильного агента в псевдооживленном слое** определяется, исходя из условия, что частицы высушенного материала наименьшего диаметра не должны уноситься потоком газа из сушилки. Скорость уноса, равная скорости свободного витания  $w'_{\text{вит}}$  при  $\epsilon = 1$ , определяется по уравнению

$$w'_{\text{вит}} = \mu_{\text{тср}} Ar_{\text{мин}} / d_{\text{мин}} \rho_{\text{тср}} [18 + 0,575 Ar_{\text{мин}}^{0,5}], \quad (6)$$

где критерий  $Ar_{\text{мин}}$  определяется по  $d_{\text{мин}}$ . Если  $d_{\text{мин}}$  не задан, то принимается равным:

$$d_{\text{мин}} = 0,5 d_3 \quad (7)$$

**Предельное число псевдооживления:**  $K_{\text{пр}} = w'_{\text{вит}} / w_{\text{кр}}$

При  $K_{\text{пр}}$  более 40 – 50 рабочее число псевдооживления  $K_w = w / w_{\text{кр}}$  рекомендуется выбирать в интервале от 3 до 7; при  $K_{\text{пр}}$  меньше 20 – 30 значение  $K_w$  можно выбирать в интервале от 1,5 до 3.

**Рабочая скорость псевдооживления:**  $w = K_w w_{\text{кр}}$

**Диаметр сушилки КС** определяют из уравнения расхода:

$$V_{\text{тср}} = 0,785 D^2 w = S w,$$

где  $S$  - площадь сечения газораспределительной решетки,  $m^2$ .

**ВЫСОТА ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ**

**Критерий  $Re_{\text{вит}}$**  для условий витания частиц размером  $d$ , шарообразной формы:

$$Re_{\text{вит}} = Ar / (18 + 0,61 Ar^{0,5}) \quad (8)$$

**Скорость витания:**

$$(w_{\text{вит}})_{\text{шар}} = Re_{\text{вит}} \mu_{\text{тср}} / d_3 \rho_{\text{тср}} \quad (9)$$

**Скорость витания для частиц нешарообразной формы:**

$$w_{\text{вит}} = (w_{\text{вит}})_{\text{шар}} \Phi^{0,5}, \quad (10)$$

где  $\Phi$  - см. формулу (2).

**Скорость витания для частиц неизометрической формы (щепы, стружка, волокно)** определяется по формуле С. Н. Светкова [2]:

$$w_{\text{вит}} = 0,14 [\rho_m / ((0,02 + \epsilon / \delta) \rho_{\text{тср}})]^{0,5}, \quad (11)$$

где  $\delta$  - толщина частиц, мм;

$\epsilon$  - коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения частиц: при прямоугольном сечении  $\epsilon = 0,9$ , при округлом или квадратном  $\epsilon = 1,1$ .

**Скорость витания для плоской стружки толщиной  $\delta \leq 0,35$  мм:**

$$w_{\text{вит}} = 0,108 [\rho_m^2 \delta / (0,007 + \epsilon)]^2 (\rho_{\text{тср}}^2 \rho_{\text{тср}})^{0,25} \quad (12)$$

Высота псевдооживленного слоя определяется на основании экспериментальных данных по кинетике как массо-, так и теплообмена.

**Критерий Нуссельта**

1. При сушке материала до конечной влажности выше критической  $\omega_{02} > (\omega_0)_{\text{кр}}$  критерий  $Nu$  рассчитывается по формуле И.М. Федорова:

$$\begin{aligned} Ar = 2,3 \cdot 10^4 - 7,5 \cdot 10^5 & \quad Nu = 0,0162 Ar^{0,246} Re^{0,65} (h_0 / d_3)^{-0,34}, & (13) \\ Ar = 7,5 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^6 & \quad Nu = 0,03 Ar^{0,2} Re^{0,65} (h_0 / d_3)^{-0,34}, & (14) \end{aligned}$$

где  $Ar = d_3 \rho_{\text{тср}} \rho_m g / (\mu_{\text{тср}})^2$ ;  $Re = w d_3 \rho_{\text{тср}} / \mu_{\text{тср}}$ ,

$w$  - рабочая скорость псевдооживления,

$h_0$  - высота неподвижного слоя (принимается  $h_0 = 150 - 200$  мм).

2. При сушке материала до конечной влажности материала меньше критической  $\omega_{02} < (\omega_0)_{\text{кр}}$  критерий  $Nu$  рассчитывается по уравнению академика А.В. Лыкова:

$$Nu = 1,6 \cdot 10^{-3} (w / w_{\text{вит}})^{-1,5} (w_{02} / w_{\text{ор}})^{1,35} Re_{\text{к}}^{0,95}, \quad (15)$$

где  $w_{\text{ор}}$  - гигроскопическая влажность материала, соответствующая критической влажности  $(w_0)_{\text{кр}}$ , %;

$Re_{\text{к}}$  - критерий  $Re$ , рассчитанный по скорости газа в каналах (прозорах):

$$w_{\text{к}} = w / \epsilon_0; \quad Re_{\text{к}} = w d_3 \rho_{\text{тср}} / \mu_{\text{тср}} \epsilon_0.$$

**Объемный коэффициент теплоотдачи**,  $Вт / (m^3 \cdot K)$ :  $\alpha_v = 6 Nu \lambda_{\text{тср}} (1 - \epsilon_0) / d^2$ ,

где  $\lambda_{\text{тср}}$  - теплопроводность сушильного агента принимается, как для воздуха, по  $t_{\text{ср}}$  и по табл.14.

Таблица 14

Теплопроводность воздуха, Вт/(м·К)

t, °C	0	100	200	300	400	500	600	700	800
10 <sup>3</sup> ·λ,т	24	32	39	46	52	57	62	66	70

Средняя разность температур, К:

$$\Delta t_{cp} = [(t_1 - \theta_1) - (t_2 - \theta_2)] / \ln[(t_1 - \theta_1) / (t_2 - \theta_2)]. \quad (16)$$

Объем рабочей зоны сушилки КС ( псевдоожигенного слоя ):

$$V_{nc} = (Q_u - Q_m) / \alpha_v \Delta t_{cp}.$$

Высота псевдоожигенного слоя:  $H_{nc} = H_{nc} / 0,785D^2$ .

Сравнивается рассчитанное значение  $H_{nc}$  с экспериментальными данными, полученными при сушке сыпучей древесины:

- при  $\omega_{a1} > 60\%$   $H_{nc} = 300 - 500$  мм;
- при  $\omega_{a1} < 60\%$   $H_{nc} = 200$  мм.

Высота сепарационного пространства:

$$H_c = (4-6)H_{nc} \quad \text{или} \quad H_c = 1,5 - 6,0 \text{ м.}$$

Высота сушильной камеры:  $H_k = 2H_{nc} + H_c$ .

Проверка: Будут ли выноситься из зоны сушки самые мелкие частицы при их конечной влажности  $\omega_{02}$ ? Для этого при конечных параметрах сушильного агента ( $t_2, x_2, \rho_{12}, \mu_{12}$ ) и при конечной влажности материала  $\omega_{02}$  рассчитывается скорость витания для самых мелких частиц  $d_{min}$  по  $w_{вит}$  и по формулам (6),(7),(10). Если окажется, что рабочая скорость псевдоожигения  $w > w'_{вит}$ , то сушилку следует делать расширенной кверху.

Сечение верхней части конусообразной сушилки КС:  $S \geq V_{12} / w'_{вит}$ .

Расчет сушилок КС для других материалов приведен в [10].

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СУШИЛКИ КС

Гидравлическое сопротивление псевдоожигенного слоя:

$$\Delta P_{nc} = \rho_m (1 - \epsilon) g H_{nc},$$

где  $\epsilon$  - порозность псевдоожигенного слоя;  $\epsilon = 0,50 - 0,75$  для однородного псевдоожигенного слоя. Критерий  $Ag$  при  $d_3$  - см. формулу (5).

Порозность псевдоожигенного слоя  $\epsilon$  при известном значении рабочей скорости псевдоожигения  $w$ :  $\epsilon = [(18Re + 0,36Re^2) / Ag]^{0,21}$ ,

где критерий  $Re = wd_3 \rho_{1cp} / \mu_{1cp}$ .

Гидравлическое сопротивление газораспределительной решетки:

$$\Delta P_p = 0,5 \xi (w / \phi)^2 \rho_{1cp},$$

где  $\phi$  - доля живого сечения решетки: для беспровальной колпачковой решетки  $\phi = 0,15 - 0,17$ ; для сеток  $\phi = 0,01 - 0,05$ ;

$\xi$  - коэффициент сопротивления решетки;  $\xi = 1,75$ .

Живое сечение газораспределительной решетки:  $\phi = \sum f_{отв} / S$ ,

где  $f_{отв}$  - площадь, занимаемая отверстиями, м<sup>2</sup>.

Число отверстий в решетке:  $n = \phi s / 0,785d_0 = \phi D^2 / d_0^2$ .

Диаметр отверстий  $d_0$  газораспределительной решетки принимается из ряда нормальных размеров, установленных ГОСТ 6636-69 (в мм): 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,2; 3,6; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6.

Гидравлическое сопротивление сушилки КС:  $\Delta P_c = \Delta P_{nc} + \Delta P_p$ .

Для удовлетворительного распределения газового потока необходимо соблюдать определенное соотношение между гидравлическими сопротивлениями слоя и решетки. Минимально допустимое гидравлическое сопротивление решетки:  $(\Delta P_p)_{min} = \Delta P_{nc} K_w^2 (\epsilon - \epsilon_0) / [(K_w^2 - 1)(1 - \epsilon_0)]$ .

Если  $\Delta P_p < (\Delta P_p)_{min}$ , необходимо выбрать другую долю живого сечения решетки  $\phi$  и провести повторный расчет  $\Delta P_p$ .

ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ ТРУБА-СУШИЛКА

РАСЧЕТ ДИАМЕТРА ТРУБЫ-СУШИЛКИ

Вертикальная труба-сушилка

Критерий  $Re_{лит}$  для условий витания частиц шарообразной формы - см. формулу (8), в которой критерий  $Ag$  определяется по формуле (5) при средних условиях:  $t_{cp} = 0,5(t_1 + t_2)$ ;  $x_{cp} = 0,5(x_1 + x_2)$ ;  $\omega_{аср} = 0,5(\omega_{a1} + \omega_{a2})$ .

Скорость витания шарообразных частиц - см. формулу (9).

Скорость витания частиц реальной формы - см. формулы (10) - (12).

Фактическая скорость сушильного агента, учитывая условия витания коллектива частиц, принимается из условия  $w_r = Kw_{вит}$ , где  $K = 1,2 - 5,0$ .

При сушке измельченной древесины  $w_r$  обычно должна составлять для опила 8 - 10 м/с, для стружки 10 - 12 м/с.

Горизонтальная труба-сушилка

Скорость газа, при которой одиночная частица, введенная в трубопровод, не осаждается на дно, а транспортируется потоком, называют критической  $w_{кр}$  и рассчитывают ее как в пневмотранспортной установке [3].

Следует различать три характерных режима транспортирования: при скорости, значительно превышающей  $w_{кр}$ , материал более или менее равномерно распределяется по поперечному сечению трубопровода; при скорости, близкой к критической, частицы движутся небольшими скачками вблизи нижней поверхности трубы; при скорости газа, меньшей критической, часть материала неподвижно располагается на дне трубопровода, остальная масса движется подобно перемещению песчаных дюн.

Наиболее неблагоприятным для транспортирования является начальный участок трубопровода, где из-за низкой скорости материала создается высокая концентрация. За участком разгона устойчивое транспортирование происходит при скорости газа, значительно меньшей критической. Так как при неизотермическом режиме скорость газа уменьшается по длине

трубопровода, то для взвешенного транспортирования достаточно, чтобы на участке разгона было выполнено условие  $w_r \geq w_{кр}$ .

**Диаметр трубы-сушилки определяется** из уравнения расхода:

$$V_{ср} = 0,785D^2 w_r$$

**Плотность сушильного агента, кг/м<sup>3</sup>:**  $\rho_{ср} = 0,5(\rho_{l1} + \rho_{l2})$ .

**Расход сушильного агента, кг/м<sup>3</sup>:**  $L_{ср} = 0,5(L_1 + L_2)$ .

**Объемный расход сушильного агента, м<sup>3</sup>/с:**  $V_{ср} = L_{ср}(1 + x_{ср})/\rho_{ср}$   
ДЛИНА ТРУБЫ-СУШИЛКИ

**Скорость движения материала в трубе-сушилке:**  $w_m = w_r - w_{внт}$ .

**Концентрация высушиваемого материала в парогазовой смеси:**

$$\bar{Y} = (G_1 + G_2)w_r / [(L_1 + L_2)(1 + x_{ср})w_m]$$

**Критерий Нуссельта по опытным данным для древесных частиц:**

$$Nu = 0,62(Re_{внт})^{0,5} \quad (17)$$

$$\text{или при } Re_{внт} \leq 47 \quad Nu = 2 + 0,16(Re_{внт})^{0,667}, \quad (18)$$

$$\text{при } Re_{внт} = 47 - 440 \quad Nu = 0,194(Re_{внт})^{0,79}, \quad (19)$$

$$\text{при } Re_{внт} > 440 - 2000 \quad Nu = 0,14(Re_{внт})^{0,5}, \quad (20)$$

где  $Re_{внт}$  - см. формулу (8), скорость витания ( $w_{внт}$ )<sub>шар</sub> - по формуле (9), а  $w_{внт}$  частиц неизометрической формы - по формулам (10) - (12).

**Объемный коэффициент теплоотдачи:**  $\alpha_v = 6Nu\lambda_{ср}\bar{Y}\rho_{ср}/d^2\epsilon\rho_m$ ,

где  $\rho_t, \lambda_t$  определяются по  $t_{ср} = 0,5(t_1 + t_2)$ ;

$\lambda_{ср}$  - см. табл. 7;  $\rho_m$  определяется при  $\omega_{а ср} = 0,5(\omega_{а1} + \omega_{а2})$  и по табл. 3.

**Средняя разность температур  $\Delta t_{ср}$**  - см. формулу (16).

**Объем трубы-сушилки:**  $V_c = (Q_u + Q_m)/\Delta t_{ср}\alpha_v$ .

**Длина зоны сушки:**  $l_3 = V_c/0,785D^2$ .

**Длина участка разгона:**  $l_p = 0,5w_rD$ .

**Общая длина трубы-сушилки:**  $l = l_3 + l_p + l_m$ ,

где  $l_m$  - длина трубы от места ввода сушильного агента до места ввода материала,  $l_m = 2$  м.

**ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБЫ-СУШИЛКИ  $\Delta P_c$**

Пример расчета  $\Delta P_c$  см. [3].

## АЭРОФОНТАННАЯ СУШИЛКА

### РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ АЭРОФОНТАННОЙ СУШИЛКИ

#### Последовательность расчета

1. Расчет диаметра горловины  $d$  проводят по параметрам сушильного агента на входе в сушилку ( $t_1, x_1, V_{l1}$ ). Находят критерий  $Ag_1$  по формуле (5)

при начальной влажности материала  $\omega_{а1}$ .

2. Рассчитывают скорость витания на входе в сушилку ( $w_{внт}$ )<sub>вх</sub> по формулам (8) - (12).

3. Скорость газа в горловине принимают  $w_{r1} = (1,5 - 2,0)(w_{внт})_{вх}$ . Скорость газа в горловине должна быть не менее:  $w_{r1} = 8 - 10$  м/с - для опила;  $w_{r1} = 10 - 12$  м/с - для щепы.

4. Диаметр горловины  $d$  рассчитывают по уравнению расхода:

$$V_{l1} = 0,785d^2w_{r1}$$

5. Диаметр широкой части конуса (рюмки) также определяют по уравнению расхода, только по объемному расходу парогазовой смеси  $V_{l2}$  на выходе из сушилки:  $V_{l2} = 0,785D^2w_{r2}$ , где  $w_{r2}$  - скорость парогазовой смеси в широкой части конуса;  $w_{r2}$  должна быть равна или меньше скорости витания ( $w_{внт}$ )<sub>вых</sub> высушенных частиц материала, рассчитанной по параметрам паровоздушной смеси на выходе из сушилки ( $t_2, x_2$ , и т.д.);  $w_{r2}$  принимается равной  $w_{r2} = (0,2 - 0,5)(w_{внт})_{вх}$  и проверяется сравнением со скоростью витания на выходе из сушилки ( $w_{внт}$ )<sub>вх</sub>, рассчитанной по формулам (8) - (12).

6. Высота конуса. Оптимальным углом раскрытия конуса для сушки древесных частиц считается угол, соответствующий 1м высоты при изменении диаметра на 0,5м [11], тогда  $H_k = 2(D-d)$ .

7. Угол раскрытия конуса:  $tg(\alpha/2) = 0,5(D-d)/H_k$ ,

где  $\alpha$  - угол раскрытия конуса, принимают в пределах  $\alpha = 20 - 70^\circ$ .

8. Объем конуса, м<sup>3</sup>:  $V_k = [\pi H_k(D^2 + d^2 + Dd)]/12$ .

9. Общий объем аэрофонтанной сушилки, м<sup>3</sup>:  $V_{суш} = W/A$ ,

где  $W$  - количество испаряемой влаги, кг/ч (см. материальный баланс);

$A$  - напряжение сушилки по испаряемой влаге, кг/(м<sup>3</sup>·ч).

Напряжение сушилки по испаряемой влаге зависит от температуры сушильного агента  $t_1$  на входе в сушилку и от начальной и конечной влажности частиц материала  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$ . При  $t_1 = 150 - 250^\circ\text{C}$  можно принять  $A$ , кг/(м<sup>3</sup>·ч):

$$\text{при } \omega_0 = 5 - 8\% \quad A = 80 - 120,$$

$$\text{при } \omega_0 = 20 - 25\% \quad A = 120 - 180.$$

10. Количество конусов (рюмок), последовательно установленных в аэрофонтанной сушилке, шт.:  $V_{суш}/V_k$ .

11. Горизонтальные участки трубопроводов на выходе из сушилки рассчитываются как пневмопроводы [3], где вместо скорости витания определяют критическую скорость  $w_{кр}$ .

### ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ АЭРОФОНТАННОЙ СУШИЛКИ

**Гидравлическое сопротивление одного конуса, Па:**

$$\Delta P = 0,062\rho_m(D/d)^{2,54}(tg(\alpha/2))^{0,18}(D/d-1),$$

где  $\rho_m$  - плотность материала при  $(\omega_a)_{ср}$ , кг/м<sup>3</sup>.

**Гидравлическое сопротивление сушилки, Па:**  $\Delta P_c = n\Delta P$ .

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СУШИЛОК**

*Технологические*

Производительность, кг/с .....  $\bar{G}_1$

Напряжение по влаге \* :

- барабанная, аэрофонтанная и труба-сушилка, кг влаги/(м<sup>3</sup>·ч).....  $A=W/V_c$

- сушилка КС, кг влаги/(м<sup>2</sup>·ч).....  $A=W/S_p$

Удельный объемный расход сушильного агента:

- барабанная, аэрофонтанная и труба-сушилка, м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·ч).....  $v=V_{г2}/V_c$

- сушилка КС, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).....  $v=V_{г2}/S_p$

*Энергетические*

Тепловой КПД процесса сушки.....  $\eta_1=Q_u/Q_{06}$

Термический КПД сушилки.....  $\eta_2=(I_1-I_2)/I_1$

Коэффициент теплового напряжения.....  $B_r=(t_1-t_2)/t_1$

Удельный расход топлива на 1 кг испаряемой влаги,  
кг топлива/кг влаги.....  $d_b=B/W$

Удельный расход топлива на 1 кг продукта, кг/кг.....  $d_G=B/G_2$

Удельный расход тепла на 1 кг испаряемой влаги,  
кДж тепла/кг влаги.....  $d_Q=Q_{06}/W$

Удельный расход электроэнергии на 1 кг испаряемой влаги,  
(кВт·ч)/кг или кДж/кг.....  $d_N=\Sigma N_i/W$

**ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ**

$\bar{G}$  - производительность по материалу, кг/с;

W - производительность по испаряемой влаге, кг/с;

ω - влажность материала, %;

w - скорость, м/с;

t, θ - температура воздуха и материала соответственно, °С;

J - теплосодержание, кДж/кг;

x<sup>i</sup> - влагосодержание, кг/кг;

φ - относительная влажность воздуха, %;

B - расход топлива, кг/с;

Q - расход тепла, кДж/с;

L - расход газа, кг/с или длина, м;

V - объемная производительность, м<sup>3</sup>/с;

d - удельный расход, кг/кг или диаметр, м;

D - диаметр сушилки, м;

ρ - плотность, кг/м<sup>3</sup>;

μ - динамическая вязкость, Па·с;

C - теплоемкость, Дж/(кг·К);

λ - теплопроводность, Вт/(м·К);

N - мощность, кВт;

S - площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

η - КПД.

**Индексы:** 1 - начальный или вход; 2 - конечный или выход; а - абсолютный; о - относительный; наружный воздух, начало псевдоожижения; кр - критический; v - объемный; г - газ; м - материал; и - испарение; пот - потери; общ - общий; п - подсос; вит - витание; э - эквивалентный; ср - средний; пс - псевдоожижение; р - решетка; t - температура; к - канал; с - сушка.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Отлев И.А. Технологические расчеты в производстве древесностружечных плит. М.: Лесная промышленность, 1979. 240 с.
2. Стерлин И.А. Сушка в производстве фанеры и древесностружечных плит. М.: Лесная промышленность, 1977. 384 с.
3. Ведерникова М.И., Старцева Л.Г., Орлов В.П., Терентьев В.Б. Проектирование сушильных установок для сушки измельченной древесины. Ч. 1. Вспомогательное оборудование. Екатеринбург: УГЛТА, 2001. 44с.
4. Ведерникова М.И. Гидравлические расчеты. Ч 1. Расчет и выбор насосов и вентиляторов. Екатеринбург: УГЛТА, 2000, 40 с.
5. Старцева Л.Г., Ведерникова М.И. Гидравлические расчеты. Ч.11. Примеры расчетов и выбора насосов и вентиляторов. Екатеринбург: УГЛТА, 2000. 44с.
6. Орлов В.П., Кожевников Н.П. Расчет топок для сушильных установок. Екатеринбург: УГЛТА, 1992. 18с.
7. Сушильные аппараты и установки. Каталог. М.: ЦИНТИХИМ-НЕФТЕМАШ, 1988. 72с.
8. Архангельский В.Д. Аппараты для сушки сыпучей древесины. М.: Лесная промышленность, 1970. 128с.
9. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию / Под ред. Ю.И. Дыгнерского. М.: Химия, 1991. 495с.
10. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1987. 576 с.
11. Соколов П.В. Проектирование сушильных и нагревательных установок для древесины. М.: Лесная промышленность, 1965. 105 с.

\* Напряжение по влаге, т.е. влаге с 1 м<sup>3</sup> или 1 м<sup>2</sup> сушилки.

**СОДЕРЖАНИЕ**

Теплофизические свойства древесины.....	3
Характеристика сушильных установок.....	8
Технологический расчет сушилок.....	25
Материальный баланс.....	25
Построение рабочей линии сушки на I-х диаграмме....	25
Тепловой баланс.....	28
Гидродинамический расчет сушилок.....	29
Барабанная сушилка.....	29
Сушилка кипящего слоя.....	32
Пневматическая труба-сушилка.....	35
Аэрофонтанная сушилка.....	36
Технико-экономические показатели сушилок.....	38
Основные условные обозначения.....	38
Список литературы.....	39