

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра автоматизации производственных процессов

А.Г. Гороховский  
Е.Е. Шишкина  
В.В. Савина

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ КАМЕР ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

Методические указания по курсу  
«Тепловая обработка и сушка древесины»  
для курсового и дипломного проектирования  
для студентов направления 250400 «Технология лесозаготовительных  
и деревоперерабатывающих производств»  
очной и заочной форм обучения

Екатеринбург  
2013

Печатается по рекомендации методической комиссии института лесопромышленного бизнеса и дорожного строительства. Протокол № 1 от 3 октября 2012 года.

Рецензент: заведующий кафедрой механической обработки древесины УГЛТУ, канд. техн. наук, доцент Чернышев О.Н.

Редактор Е.Л. Михайлова  
Оператор компьютерной верстки Е.В. Карпова

---

Подписано в печать		Поз. 16
Плоская печать	Формат 60×84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	Тираж 10 экз.
Заказ №	Печ. л. 3,25	Цена руб. коп.

---

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ  
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

## ВВЕДЕНИЕ

В методических указаниях дана методика расчётов при проектировании сушильных камер периодического действия, получивших наибольшее распространение на деревообрабатывающих производствах, а также цехов на базе этих камер.

Курсовой проект по дисциплине «Тепловая обработка и сушка древесины» выполняется в объеме технического проекта без строительных и экономических расчетов. Для разработки проекта составляется задание на проектирование, которое выдаётся индивидуально каждому студенту.

Курсовой проект состоит из расчетно-пояснительной записки и графической части на листах формата А1 (594x841). Количество листов определяется руководителем проекта.

Расчетно-пояснительная записка включает в себя введение и четыре раздела: технологический, тепловой, аэродинамический расчеты и описание технологического процесса сушки пиломатериалов с указанием применяемого оборудования.

Во введении расчетно-пояснительной записки курсового и дипломного проекта должно быть отражено состояние и перспективы развития техники и технологии камерной сушки пиломатериалов.

На листе графической части вычерчивается планировка сушильного цеха с обслуживающими и бытовыми помещениями, применяемое оборудование для формирования и расформирования штабелей пиломатериалов, средств передвижения штабелей от места формирования на склад сырых пиломатериалов или в сушильную камеру и к месту разборки сухих штабелей.

При выполнении курсового или дипломного проекта студенты могут пользоваться литературой [1–6].

## 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

### 1.1. Определение режима сушки пиломатериалов

**Режимом сушки** называется расписание параметров сушильного агента.

В зависимости от требований, предъявляемых к качеству древесины, пиломатериалы могут высушиваться режимами различных категорий по температурному уровню (мягкие, нормальные, форсированные).

Категория режима сушки определяется исходя из возможностей проектируемой камеры, а именно максимальной температуры в рабочем пространстве камеры (см. задание). При этом

$$t_3 \leq t_{\max}, \quad (1.1)$$

где  $t_3$  – температура III ступени режима сушки пиломатериалов, °С;

$t_{\max}$  – максимальная температура в рабочем пространстве камеры, °С.

Максимально возможная температура в рабочем пространстве камеры зависит от вида теплоносителя, применяемого при сушке пиломатериалов.

При выборе режима сушки пиломатериалов при прочих равных условиях нужно придерживаться *принципа эффективности*, т.е. выбирать такой режим, который обеспечит необходимое качество сушки при меньшей её продолжительности.

Режимы сушки пиломатериалов различных пород приведены в прил. 1–8.

В случае, если максимальная температура рекомендованного режима превышает возможности проектируемой камеры, следует выбрать более мягкий режим для той же породы, т.е. режим, рекомендованный для тех же условий, но для более толстых досок.

### 1.2. Определение продолжительности сушки в камерах периодического действия при низкотемпературном процессе

Общая продолжительность сушки (включая длительность начального прогрева и влаготеплообработки), определяется по выражению

$$\tau_{\text{суш}} = \tau_{\text{исх}} A_p A_{\text{ц}} A_v A_k A_d, \quad (1.2)$$

где  $\tau_{\text{исх}}$  – исходная продолжительность сушки пиломатериалов заданной породы, толщины и ширины нормальным режимом в камерах с принудительной реверсивной циркуляцией средней интенсивности (расчетная скорость воздуха 1 м/с, ширина штабеля 1,5 – 2,0 м) от начальной влажности 60 % до конечной влажности 12 %. Величина  $\tau_{\text{исх}}$ , ч., определяется по таблице прил. 9.

Коэффициент  $A_p$  учитывает жесткость применяемого режима сушки и составляет:

- для мягких режимов  $A_p = 1,7$ ;
- для нормальных режимов  $A_p = 1,0$ ;
- для форсированных режимов  $A_p = 0,8$ .

Коэффициент  $A_{ц}$  учитывает характер и интенсивность циркуляции воздуха в камере и может быть определен по табл. 1.1, в зависимости от величины произведения  $\tau_{исх}A_p$  и скорости циркуляции  $\omega_{ц}$ .

Таблица 1.1

Значение коэффициента  $A_{ц}$  для камер с реверсивной циркуляцией

Произведение $\tau_{исх}A_p$ , ч	Скорость циркуляции $\omega_{ц}$ , м/с			
	1,0	1,50	2,0	2,50
<b>20</b>	1,0	0,78	0,63	0,54
<b>40</b>	1,0	0,81	0,67	0,59
<b>60</b>	1,0	0,84	0,71	0,64
<b>80</b>	1,0	0,85	0,76	0,72
<b>100</b>	1,0	0,88	0,81	0,79
<b>140</b>	1,0	0,92	0,91	0,90
<b>180</b>	1,0	0,96	0,95	0,94
<b>220 и более</b>	1,0	0,99	0,98	0,97

Коэффициент  $A_B$ , зависящий от начальной  $W_H$  и конечной  $W_K$  влажности пиломатериалов, определяется по табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения коэффициента  $A_B$

Начальная влажность, $W_H$ , %	Конечная влажность, $W_K$ , %						
	20	18	15	12	10	8	7
<b>90</b>	0,93	1,00	1,20	1,25	1,36	1,51	1,58
<b>80</b>	0,86	0,93	1,05	1,18	1,29	1,43	1,51
<b>70</b>	0,78	0,84	0,96	1,10	1,21	1,35	1,43
<b>65</b>	0,74	0,80	0,90	1,05	1,16	1,30	1,38
<b>60</b>	0,68	0,75	0,87	1,00	1,11	1,25	1,33
<b>55</b>	0,63	0,69	0,81	0,94	1,06	1,20	1,28
<b>50</b>	0,57	0,63	0,75	0,89	1,00	1,14	1,22
<b>45</b>	0,50	0,57	0,68	0,82	0,93	1,07	1,15
<b>40</b>	0,43	0,49	0,61	0,75	0,86	1,00	1,08

Коэффициент  $A_K$ , учитывающий длительность влаготеплообработки и кондиционирования древесины в камере, имеет следующие значения:

- для I категории качества сушки – 1,15;
- для II категории качества сушки – 1,1;
- для III категории качества сушки – 1,1;
- для 0 категории качества сушки – 1.

Коэффициент  $A_d = 1,0$  для пиломатериалов, для заготовок он зависит от отношения длины материала к его толщине (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Значения коэффициента  $A_d$  при сушке заготовок

L/S	$\geq 40$	35	30	25	20	15	10	7	5
$A_d$	1,0	0,97	0,95	0,93	0,91	0,88	0,8	0,7	0,6

### 1.3. Пересчёт объёма фактического пиломатериала в объём условного материала

Поскольку производительность сушильных камер зависит от характеристики подлежащего сушке материала, для планирования и учёта их работы установлена учётная единица – *кубометр условного материала*.

Таким образом, как правило, при планировании работы сушильных цехов и расчёте производительности сушильных камер весь объём подлежащего сушке пиломатериала необходимо перевести в объём условного материала.

*Условному материалу эквивалентны сосновые обрезные доски толщиной 40 мм, шириной 150 мм, длиной более 1 м, высушиваемые по II категории качества от начальной влажности 60 % до конечной 12 %.*

Объём подлежащего сушке пиломатериала заданной спецификации  $\Phi$  (м<sup>3</sup>) пересчитывается в объём условного материала  $У$  (м<sup>3</sup> усл.) по формуле

$$У = \Phi K, \quad (1.3)$$

где  $\Phi$  – объём подлежащих сушке фактических пиломатериалов данного размера и породы (задаётся в спецификации), м<sup>3</sup>;

$K$  – коэффициент пересчёта.

$$K = K_{\tau} K_E, \quad (1.4)$$

где  $K_{\tau}$  – коэффициент продолжительности оборота камеры;

$K_E$  – коэффициент ёмкости (вместимости) камеры.

$$K_{\tau} = \frac{\tau_{об.ф}}{\tau_{об.усл}}, \quad (1.5)$$

где  $\tau_{об.ф}$  – продолжительность оборота камеры при сушке фактического пиломатериала данного размера и породы, сут.;

$\tau_{об.усл}$  – продолжительность оборота камеры при сушке условного материала, сут.

Для камер периодического действия

$$\tau_{об.ф} = \tau_{суш.ф} + \tau_{загр}, \quad (1.6)$$

$$\tau_{об.усл} = \tau_{суш.усл} + \tau_{загр}, \quad (1.7)$$

где  $\tau_{суш}$  – продолжительность процесса сушки фактического (условного) пиломатериала, сут (определяется по формуле (1.2));

$\tau_{загр}$  – время загрузки и разгрузки камеры (можно принять 0,1 сут).

Коэффициент ёмкости (вместимости) камеры определяется отношением коэффициентов объёмного заполнения штабеля условным  $\beta_{усл}$  и фактическим материалом  $\beta_{ф}$ :

$$K_E = \frac{\beta_{усл}}{\beta_{ф}}. \quad (1.8)$$

Коэффициент  $\beta_{\text{усл}}$  или  $\beta_{\text{ф}}$  равен произведению коэффициентов заполнения штабеля по длине  $\beta_{\text{д}}$ , ширине  $\beta_{\text{ш}}$  и высоте  $\beta_{\text{в}}$ . С учётом объёмной усушки пиломатериалов  $Y_0$  величина  $\beta_{\text{усл}}$  или  $\beta_{\text{ф}}$  находится по формуле

$$\beta = \beta_{\text{д}}\beta_{\text{ш}}\beta_{\text{в}} \frac{100 - Y_0}{100}, \quad (1.9)$$

где  $\beta_{\text{д}}, \beta_{\text{ш}}, \beta_{\text{в}}$  – линейные коэффициенты заполнения штабеля по длине, ширине и высоте соответственно;

$Y_0$  – объёмная усушка древесины, %.

Объёмную усушку определяют по формуле

$$Y_0 = k_v (W_{\text{ном}} - W_{\text{к}}), \quad (1.10)$$

где  $k_v$  – коэффициент объёмной усушки древесины (прил. 10);

$W_{\text{ном}}$  – влажность, для которой устанавливают номинальные размеры по толщине и ширине пиломатериалов, %, (можно принять  $W_{\text{ном}} = 20$  %);

$W_{\text{к}}$  – конечная влажность пиломатериалов, %.

Коэффициент заполнения по длине штабеля  $\beta_{\text{д}}$  показывает отношение средней длины уложенных в штабель пиломатериалов  $L_{\text{ср}}$  к его длине  $L$ :

$$\beta_{\text{д}} = \frac{L_{\text{ср}}}{L}. \quad (1.11)$$

Для штабеля пиломатериалов различной длины можно принять  $\beta_{\text{д}} = 0,85$ . Если длина всех досок в штабеле одинакова ( $L_{\text{ср}} = L$ ), то  $\beta_{\text{д}} = 1,0$ .

Коэффициент заполнения по ширине  $\beta_{\text{ш}}$  – это отношение суммарной ширины пиломатериалов в горизонтальном ряду штабеля к его ширине. Он зависит от вида пиломатериалов и способа укладки.

Пиломатериал укладывают в штабель *со шпациями* (расстояниями между досками по ширине штабеля) при естественной и слабой (до 1 м/с) принудительной циркуляции агента сушки по штабелю, а также в случае продольной циркуляции и при атмосферной сушке Во всех остальных случаях пиломатериал в штабель укладывают *без шпаций*.

Рекомендуемые для расчетов средние значения  $\beta_{\text{ш}}$  приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4.

Значения коэффициента заполнения штабеля по ширине ( $\beta_{\text{ш}}$ )

Способ укладки	Вид пиломатериалов	
	обрезные	необрезные
Со шпациями	0,65	0,43
Без шпаций	0,90	0,60

Коэффициент заполнения штабеля по высоте  $\beta_{\text{в}}$  характеризует отношение суммарной толщины пиломатериалов в вертикальном ряду штабеля к его высоте:

$$\beta_{\text{в}} = \frac{S_1}{S_{\text{нр}} + S_1}, \quad (1.12)$$

где  $S_1$  – толщина пиломатериалов, мм;

$S_{np}$  – толщина прокладок, мм.

Наиболее часто применяемая толщина прокладок составляет 25 мм.

Если в спецификации на сушку мы имеем несколько пород и типоразмеров пиломатериалов, то для учёта общего количества высушиваемого пиломатериала при планировании работы сушильного цеха и расчёте производительности сушильных камер необходимо объём пиломатериалов из каждого пункта спецификации перевести в объём условного материала, а затем сложить их, получив общий объём условного материала  $\Sigma Y$ , высушиваемого в цехе (камере) в расчётный период:

$$\Sigma Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n. \quad (1.13)$$

#### 1.4. Расчёт производительности сушильных камер

Производительность сушильных камер зависит от породы древесины, начальной и конечной влажности, применяемого режима сушки, а также от размеров подлежащих сушке пиломатериалов.

При проектировании принято устанавливать производительность камеры в год, м<sup>3</sup>/год:

$$P_{усл} = \frac{T}{\tau_{об.усл}} E_{усл}, \quad (1.14)$$

где  $T$  – период времени, за который определяется производительность, сут.;

$\tau_{об.усл}$  – продолжительность оборота камеры при сушке пиломатериалов, сут., определяется по формуле (1.7);

$E_{усл}$  – ёмкость (вместимость) камеры в условном материале, м<sup>3</sup>.

С учётом необходимости технического обслуживания и ремонта камер количество дней работы камеры в году составит

$$T = 365k_{ис} = 365 \cdot 0,92 = 335 \text{ сут.} \quad (1.15)$$

где  $k_{ис}$  – коэффициент технического использования камер.

Ёмкость (вместимость) камеры  $E$ , м<sup>3</sup> усл., рассчитывается по выражению

$$E_{усл} = LBH\beta_{усл}m, \quad (1.16)$$

где  $L$ ,  $B$ ,  $H$  – размеры штабеля (длина, ширина, высота), м;

$\beta_{усл}$  – объёмный коэффициент заполнения штабеля условным материалом (формула (1.9));

$m$  – число штабелей в камере.

Габаритные размеры штабеля и их количество зависят от технической характеристики сушильной камеры.

Производительность сушильной камеры принято определять в условных материалах, но при необходимости она может быть определена и в фактических пиломатериалах с подстановкой в формулу (1.14) соответствующих значений продолжительности сушки и вместимости камеры.



**Количество сушильных камер**, необходимых для обеспечения сушки за расчётный период всех пиломатериалов из спецификации, рассчитывают по формуле

$$N = \frac{\Sigma Y}{P_{\text{усл}}}. \quad (1.17)$$

Получившееся значение округляют до целого числа в большую сторону.

## 2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

Цель теплового расчета – определение затрат теплоты на сушку пиломатериалов, расходов теплоносителя и воздуха, выбор типа и расчет параметров нагревательных устройств.

### 2.1. Выбор расчетного материала

Производительность теплового и циркуляционного оборудования, системы воздухообмена камеры должна обеспечивать требуемые технологические режимы сушки любого из имеющихся в спецификации материалов. И хотя пиломатериалы, подлежащие сушке, обычно отличаются размером, влажностью, назначением, породой, нет необходимости в тепловом расчете относительно каждого из них.

В качестве расчетного достаточно выбрать один из входящих в спецификацию материалов, сушка которого потребует максимальных расходов тепловой энергии, агента сушки и свежего воздуха. Соответственно этим нагрузкам производится расчет теплового оборудования, систем воздухообмена и циркуляции.

Тепловая мощность камеры в значительной степени зависит от интенсивности сушки. Чем интенсивнее сушка, тем большей должна быть и тепловая мощность камеры. Поэтому тепловой расчет проводится относительно наиболее быстросохнущего (сравнивают продолжительности сушки) из имеющихся в спецификации материалов. Его и выбирают в качестве расчетного.

### 2.2. Определение количества испаряемой из материала влаги

Количество влаги, испаряемой из древесины, устанавливают на единицу объема высушиваемого материала за период оборота камеры и в единицу времени.

Массу влаги, испаряемой из 1 м<sup>3</sup> расчётного пиломатериала за весь цикл сушки, кг/м<sup>3</sup>, рассчитывают как

$$M_{1\text{м}^3} = \rho_{\text{баз}} \frac{(W_n - W_k)}{100}, \quad (2.1)$$

где  $\rho_{баз}$  – базисная плотность расчётного материала, кг/м<sup>3</sup> (прил. 10);

$W_n, W_k$  – соответственно, начальная и конечная влажность расчётного материала, %.

Количество влаги, кг, испаряемой за время одного оборота камеры, определяют по формуле

$$M_{об.к} = M_{лм^3} E_k, \quad (2.2)$$

где  $E_k$  – вместимость камеры в расчетном материале, м<sup>3</sup>.

Среднечасовое количество испаряемой в камере влаги, кг/ч, определяется как

$$M_{ср.ч} = \frac{M_{об.к}}{\tau_{суш}}, \quad (2.3)$$

где  $\tau_{суш}$  – продолжительность сушки расчетного материала, ч.

Кроме того, для камер периодического действия определяется расчетное количество испаряемой влаги,  $M_p$ , кг/ч, с помощью которого учитывают неравномерность удаления влаги в различные периоды сушки:

$$M_p = M_{ср.ч} \chi, \quad (2.4)$$

где  $\chi$  – коэффициент неравномерности скорости сушки, принимаемый в зависимости от значения конечной влажности древесины: при  $W_k = 12 - 15\%$   $\chi = 1,2$ ; при  $W_k < 12\%$   $\chi = 1,3$ .

### 2.3. Расчётные параметры сушильного агента

Для последующих расчётов требуется знать значения параметров сушильного агента на входе его в штабель, на выходе из штабеля, а также параметры свежего приточного воздуха.

Известно, что процесс сушки в камере периодического действия может быть охарактеризован как процесс с многократной циркуляцией агента сушки по штабелю (рис.2.1).

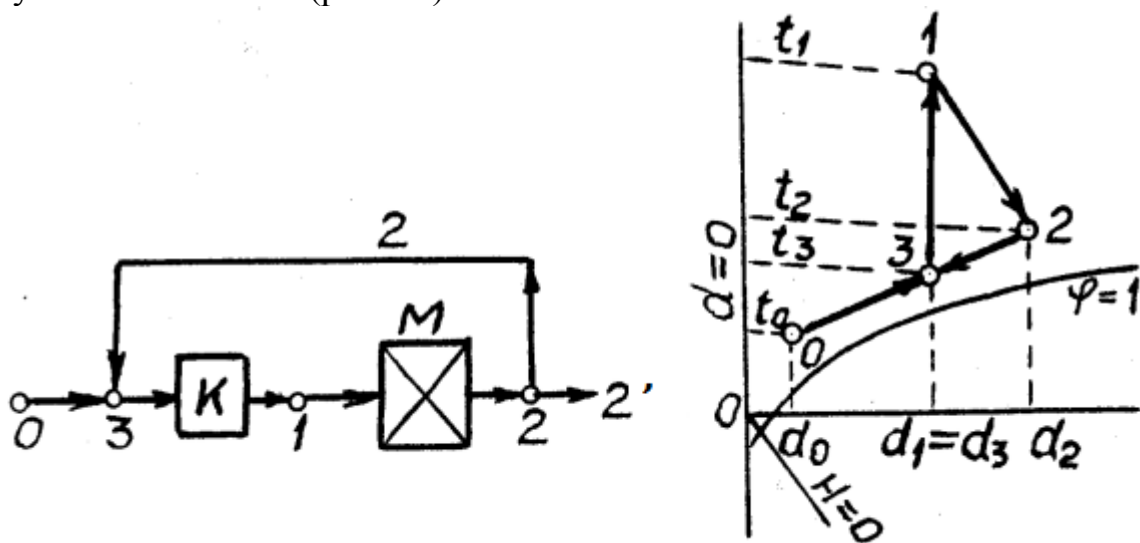


Рис. 2.1. Схема циркуляции агента сушки в камере с многократной циркуляцией

То есть нагретый калорифером воздух 1 проходит через штабель, испаряет из него влагу и на выходе 2 может быть частично удалён из камеры через вытяжные каналы 2' и тогда в камеру поступает свежий приточный воздух 0 (через приточные каналы), который образует смесь с отработанным воздухом 3, который, проходя через калорифер, вновь приобретает состояние 1. Такая схема циркуляции воздуха в камере позволяет поддерживать заданные режимные параметры.

Таким образом, согласно схеме на рис. 2.1 в дальнейших расчётах рекомендуется принять следующие индексы к определяемым параметрам:

- 1 – параметры агента сушки на входе в штабель;
- 2 – параметры агента сушки на выходе из штабеля;
- 0 – параметры свежего приточного воздуха.

### 2.3.1. Определение параметров агента сушки на входе в штабель

Состояние среды на входе в штабель высушиваемого материала ( $t$ ,  $\Delta t$ ,  $\varphi$ ) регламентируется выбранным режимом сушки (табл. 2.1).

Режимы сушки пиломатериалов в камерах периодического действия многоступенчатые с параметрами агента сушки, отличающимися на каждой из ступеней. При низкотемпературном процессе для расчёта рекомендуется принимать параметры агента сушки по II (средней) ступени режима.

Данные, взятые из режима сушки, вносятся в см. табл. 2.1.

Кроме параметров, установленных в режиме ( $t$ ,  $\Delta t$ ,  $\varphi$ ), для дальнейших расчётов необходимо определить также влагосодержание ( $d_1$ , г/кг сух. воздуха), теплосодержание (энтальпию) воздуха ( $I_1$ , кДж/кг исп. влаги), его плотность ( $\rho_1$ , кг/м<sup>3</sup>) и приведённый удельный объём ( $V_{пр1}$ , м<sup>3</sup>/кг сух. воздуха). Перечисленные параметры могут быть найдены по Id-диаграмме влажного воздуха (прил. 11, рис. 2.2). Однако для более точных расчётов рекомендуется воспользоваться формулами, приведёнными ниже. Полученные значения также заносятся в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Расчётные параметры сушильного агента на входе в штабель

Ступень режима	Переходная влажность, %	$t_1$ , °C	$\varphi_1$	$\Delta t_1$ , °C	$t_{m1}$ , °C	$d_1$ , г/кг	$I_1$ , кДж/кг	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$V_{пр1}$ , м <sup>3</sup> /кг

$$d_1 = 622 \frac{\varphi_1 P_{n.1}}{P_a - \varphi_1 P_{n.1}}, \quad (2.5)$$

где  $\varphi_1$  – степень насыщенности агента сушки;

$P_a$  – атмосферное давление воздуха (0,1 МПа);

$P_{n1}$  – давление насыщения водяного пара при расчетной температуре воздуха, Па (прил. 12).

$$I = t_1 + 0,001d_1(1,93t_1 + 2490), \quad (2.6)$$

$$\rho = \frac{349 - 132 \left( \frac{d_1}{622 + d_1} \right)}{273 + t_1}. \quad (2.7)$$

$$V_{npl} = 4,62 \cdot 10^{-6} (273 + t_1)(622 + d_1). \quad (2.8)$$

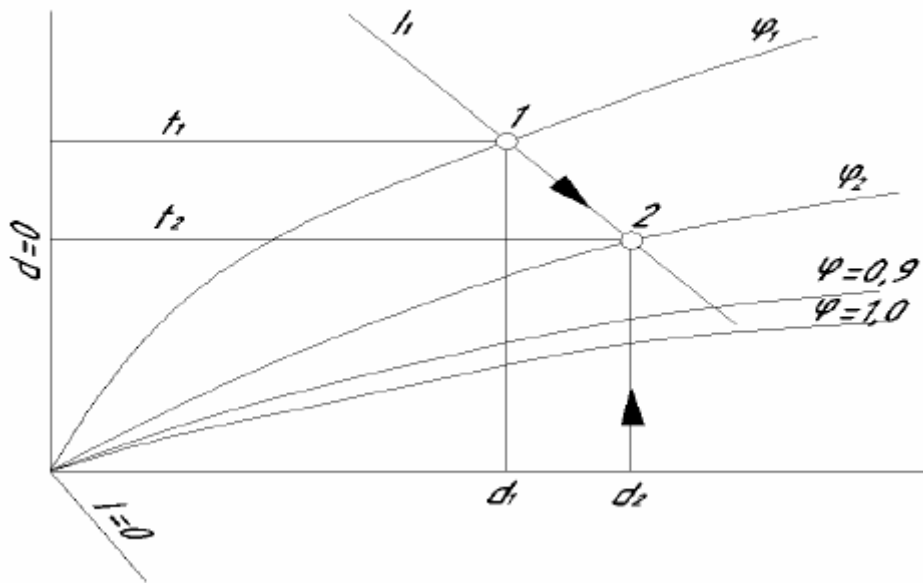


Рис. 2.2. Схема построения теоретического процесса сушки на Id-диаграмме

### 2.3.2. Определение параметров свежего приточного воздуха

Параметры наружного воздуха требуются при определении расходов тепла на сушку, для расчёта системы воздухообмена в камере, в технико-экономических расчётах.

При выборе параметров вводимого в камеру свежего воздуха необходимо учитывать географическое расположение камеры, период года, место отбора воздуха и т.п.

При отборе воздуха из отапливаемого помещения (коридора управления, цеха, где установлена камера) параметрами свежего воздуха будут температура и влажность, характерные для этого помещения. В соответствии со СНиП II – 33 – 75 расчётные параметры должны находиться в пределах  $t_0 = 18 \dots 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Если в качестве свежего используется наружный воздух, то его параметры выбираются по климатологическим таблицам (СНиП II – 1.6 – 72).

В табл. 2.2 приведены климатологические данные для некоторых городов России.

По зимним условиям рассчитывают максимальную тепловую нагрузку камеры, тепловую мощность калориферов; по летним – сечение приточно-вытяжных каналов. Среднегодовые параметры необходимы для определения основных технико-экономических показателей.

При подаче воздуха в камеру из отапливаемого помещения (коридора управления, цеха, лаборатории) его параметры для расчёта принимают в соответствии со СНиП – 33 – 75 в пределах:  $t_0 = 18 \dots 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_0 = 0,5 \dots 0,7$ .

Для удобства расчётов все параметры наружного воздуха рекомендуется представить в виде табл. 2.3.

Таблица 2.3

Расчётные параметры наружного воздуха

Условия	$t_0, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\varphi_0$	$d_0, \text{ г/кг}$	$I_0, \text{ кДж/кг}$	$\rho_0, \text{ кг/м}^3$	$V_{\text{пр}0}, \text{ м}^3/\text{кг}$
Зимние						
Летние						
Среднегодовые						

Влагосодержание  $d_0$ , теплосодержание  $I_0$ , плотности  $\rho_0$  и приведенный удельный объем  $V_{\text{пр}0}$  рассчитывают по формулам (2.5 – 2.8).

Таблица 2.2

Климатологические данные некоторых городов России (СНиП II – 1.6 – 72)

Город	Расчетная температура		Среднегодовая температура $t_{\text{ср}}$ , $^\circ\text{C}$	Средняя температура отопительного сезона $t_{\text{ср.отоп}}$ , $^\circ\text{C}$	Продолжительность отопительного сезона $T_{\text{отоп}}$ , дней	Степень насыщенности среды $\varphi$ , %, при условиях		
	Для отопления $t_{0.з}$	Для вентиляции (летнее время) $t_{0.лет}$				летних	зимних	среднегодовых
Екатеринбург	– 32	21	0,8	– 8,2	214	70,7	85,0	76,8
Архангельск	– 32	18	0,2	– 6,5	232	75,0	86,3	81,3
Владивосток	– 24	24	4,6	– 6,3	171	83,3	72,3	75,3
Воронеж	– 25	25	5,6	– 5,0	177	70,0	86,5	73,7
Н.Новгород	– 29	22	3,6	– 6,1	193	70,7	85,7	78,0
Иркутск	– 38	23	– 1,3	– 10,8	215	67,7	82,7	71,2
Красноярск	– 36	24	0,6	– 9,3	210	69,0	80,0	73,4
С.Петербург	– 24	20	4,1	– 3,7	193	71,0	87,0	79,5
Москва	– 30	21	3,6	– 5,3	194	62,7	86,0	79,0
Омск	– 37	23	0,0	– 10,9	208	67,0	85,0	75,9
Пермь	– 33	21	1,3	– 8,0	209	73,3	85,0	78,5
Саратов	– 24	23	5,0	– 6,1	174	58,0	85,3	72,3

### 2.3.3. Определение количества циркулирующего в камере сушильного агента

Для камер периодического действия расчет проводят следующим образом.

Определяют объем циркулирующего в штабеле (штабелях) агента сушки  $V_{шт}$ , м<sup>3</sup>/ч:

$$V_{шт} = 3600 m \omega_{шт} F_{ж.с.шт}, \quad (2.9)$$

где  $F_{ж.с.шт}$  – площадь живого сечения штабеля, м<sup>2</sup>;

$m$  – число штабелей в плоскости, перпендикулярной направлению потока агента сушки;

$\omega_{шт}$  – скорость агента сушки в штабеле, м/с.

Площадь живого сечения штабеля  $F_{ж.с.шт}$ , м<sup>2</sup>, вычисляют по формуле

$$F_{ж.с.шт} = F_{габ} (1 - \beta_g), \quad (2.10)$$

где  $F_{габ}$  – площадь габаритного сечения штабеля в плоскости, перпендикулярной направлению потока, м<sup>2</sup>;

$\beta_g$  – коэффициент заполнения штабеля по высоте.

Массу циркулирующего по материалу агента сушки в единицу времени  $G_{шт}$ , кг/ч, определяют по формуле

$$G_{шт} = \frac{V_{шт}}{V_{нр1}}, \quad (2.11)$$

где  $V_{нр1}$  – приведенный удельный объем агента сушки, соответствующий режимным значениям II ступени (см. табл. 2.1), м<sup>3</sup>/кг.

Количество циркулирующего по материалу агента сушки, приходящееся на 1 кг испаряемой влаги  $g_{шт}$ , кг<sub>сух.возд</sub>/кг<sub>исп.влаги</sub>, рассчитывают как

$$g_{шт} = \frac{G_{шт}}{M_p}, \quad (2.12)$$

где  $M_p$  – расчетное количество испаряемой в единицу времени из материала влаги, кг/ч.

Влагосодержание агента сушки на выходе из штабеля (штабелей)  $d_2$ , г/кг, определяют по формуле

$$d_2 = d_1 + \frac{1000}{g_{шт}}, \quad (2.13)$$

где  $d_1$  – влагосодержание агента сушки на входе в штабель (штабеля) для II ступени режима (см. табл. 2.1), г/кг

Перепад температуры агента сушки в штабеле (штабелях)  $\Delta t_{шт}$ , °С, рассчитывают, используя формулу

$$\Delta t_{шт} = \frac{d_2 - d_1}{0,4 + 0,00074 d_1}. \quad (2.14)$$

**Примечание.** Высокие значения  $\Delta t_{шт}$  свидетельствуют о возможной неравномерности просыхания материала (потребуется увеличение продолжительности процесса сушки для выравнивания неравномерности влажности).

Малый температурный перепад свидетельствует о большом количестве циркулирующего воздуха, в этом случае сушка будет проходить равномерно, но при большом расходе электрической энергии на привод вентиляторов.

В том и другом случае будет возрастать себестоимость сушки. Оптимальными значениями  $\Delta t_{шт}$  (по результатам промышленных испытаний сушильных камер) принято считать для пиломатериалов:

- хвойных пород – 3 – 4 °С;
- твердых лиственных пород и лиственницы – 1,5 – 2,5 °С;
- мягких лиственных пород – 2 – 3 °С.

Далее определяют температуру агента сушки на выходе из штабеля  $t_2$ , °С:

$$t_2 = t_1 - \Delta t. \quad (2.15)$$

Затем по формулам (2.7) и (2.8) рассчитывают плотность  $\rho_2$  и приведенный удельный объем  $V_{пр2}$  агента сушки в состоянии на выходе из штабеля.

Степень насыщенности сушильного агента на выходе из штабеля можно определить по отношению:

$$\phi_2 = \frac{d_2 P_a}{622 P_{н2} + d_2 P_{н2}}, \quad (2.16)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление воздуха (0,1 Мпа);

$P_{н2}$  – давление насыщения водяного пара при температуре воздуха на выходе из штабеля  $t_2$ , Па (см. прил. 12).

Полученные значения параметров агента сушки на выходе из штабеля заносят в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Расчётные параметры сушильного агента на выходе из штабеля

Степень режима	Переходная влажность, %	$t_2$ , °С	$\phi_2$	$d_2$ , г/кг	$I_2$ , кДж/кг	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	$V_{пр2}$ , м <sup>3</sup> /кг

В завершение рассчитывают объем агента сушки, циркулирующего в единицу времени в камере:

$$V_u = \frac{V_{ум}}{\eta_n}, \quad (2.17)$$

где  $\eta_n$  – коэффициент использования потока (отношение объема сушильного агента, проходящего через штабеля, к общему объему циркулирующего в камере воздуха), принимается  $\eta_n = 0,75 \dots 0,85$ .

## 2.4. Определение параметров воздухообмена и расчет приточно-вытяжных каналов

Система воздухообмена сушильной камеры обеспечивает удаление из неё воды, испаренной из древесины и приток в камеру более сухого по отношению к находящемуся там воздуха. Для этого имеются приточные и

вытяжные каналы. Они работают за счёт разности давлений, создаваемых циркуляционными вентиляторами.

В камерах с нереверсивной циркуляцией каждый канал выполняет только одну функцию. Канал, расположенный в зоне избыточного давления, является вытяжным, а канал в зоне разрежения – приточным. В случае реверсивной циркуляции функции приточного и вытяжного каналов меняются в зависимости от направления вращения вентиляторов.

Расчет проводят на условия, соответствующие максимальному воздухообмену. Параметры свежего воздуха выбирают по летнему периоду времени или климатическим условиям помещения, из которого происходит отбор свежего воздуха (коридора управления, здания цеха).

Для подогрева приточного воздуха иногда используются рекуператоры, которые позволяют экономить тепловую энергию. При их применении для расчётов каналов используют параметры, которые даны в технических характеристиках рекуператоров.

Расчет системы воздухообмена производится следующим образом.

Определяется масса свежего и отработавшего воздуха, приходящегося на 1 кг испаряемой влаги, кг/кг:

$$g_0 = \frac{1000}{d_2 - d_0}, \quad (2.18)$$

где  $d_2$  – влагосодержание агента сушки на выходе из штабеля, г/кг<sub>сух.возд</sub>;

$d_0$  – влагосодержание свежего воздуха, г/кг<sub>сух.возд</sub>.

Массовый расход свежего и отработавшего воздуха, кг/ч

$$G_0 = g_0 M_p, \quad (2.19)$$

где  $M_p$  – расчетное количество влаги, испаряемой в единицу времени в камере, кг/ч.

Объем отработавшего воздуха, м<sup>3</sup>/ч определяется как

$$V_{отр} = G_0 V_{пр2}. \quad (2.20)$$

Объем свежего воздуха, м<sup>3</sup>/ч составляет

$$V_{св.г} = G_0 V_{пр0}. \quad (2.21)$$

Площадь живого сечения приточного и вытяжного каналов, м<sup>2</sup>:

$$F_{приткан} = \frac{V_{св}}{3600 \omega_{кан}}, \quad (2.22)$$

$$F_{выт.кан} = \frac{V_{отр}}{3600 \omega_{кан}}, \quad (2.23)$$

где  $\omega_{кан}$  – расчетная скорость потоков отработавшего или свежего воздуха в канале, м/с.

Скорость потока среды в приточно-вытяжных каналах  $\omega_{кан}$  принимают для воздушных камер в пределах 3 – 5 м/с.

Приточно-вытяжные каналы могут быть круглой, квадратной или прямоугольной формы. Зная площадь канала, можно установить его размеры (диаметр, стороны квадрата или прямоугольника).



$$F_{кан} = ab \quad \text{или} \quad D_{кан} = \sqrt{\frac{4F_{кан}}{3,14}}. \quad (2.24)$$

В камерах периодического действия с реверсивной циркуляцией приточные и вытяжные каналы принимаются с одинаковыми размерами, в камерах с нереверсивной циркуляцией – с разными.

## 2.5. Определение расхода тепловой энергии на сушку пиломатериалов

Суммарный расход тепла на сушку состоит из затрат тепла на прогрев древесины, испарение из нее влаги, компенсацию тепловых потерь через ограждения камеры.

Под затратами тепла на испарение влаги при низкотемпературных режимах сушки подразумевается не только расход тепла на собственно испарение влаги, но также и тепла, расходуемого на подогрев свежего воздуха, поступающего в камеру.

Расчет тепла по всем статьям затрат производят в двух вариантах:

- 1) для зимних условий (определяют тепловую нагрузку системы теплоснабжения, нагрева агента сушки);
- 2) для среднегодовых условий с целью определения технико-экономических показателей теплопотребления.

### 2.5.1. Расход тепла на прогрев древесины

Расход тепла на прогрев 1 м<sup>3</sup> замороженной древесины (для зимних условий)  $Q_{np,1м^3}^3$ , кДж/м<sup>3</sup>, определяют по формуле

$$Q_{np,1м^3}^3 = \rho [c_{(-)}(-t_0) + c_{(+)}t_{np}] + \rho_{баз} \frac{W_n - W_{з.ж}}{100} r_{ог}, \quad (2.25)$$

где  $\rho$  – плотность древесины при  $W_n$ , кг/м<sup>3</sup>;

$t_0$  – начальная отрицательная температура древесины, загруженной в камеру, °С;

$t_{np}$  – температура, до которой прогревается древесина в камере (равна температуре смоченного термометра на первой ступени режима сушки), °С;

$W_{з.ж}$  – количество связанной незамерзшей влаги, содержащейся в древесине, %;

$r_{ог}$  – теплота плавления льда, принимается равной 335 кДж/кг;

$c_{(-)}$ ,  $c_{(+)}$  – соответственно удельные теплоемкости замороженной и прогретой до положительной температуры древесины, кДж/(кг·град).

Плотность древесины устанавливают по диаграмме, приведенной на рис. 2.3, удельные теплоемкости  $c_{(-)}$  и  $c_{(+)}$  – по диаграмме, приведенной на рис. 2.4.

Величину  $W_{г.ж}$  устанавливают по графику относительного содержания в древесине незамерзшей связанной влаги (рис. 2.5).

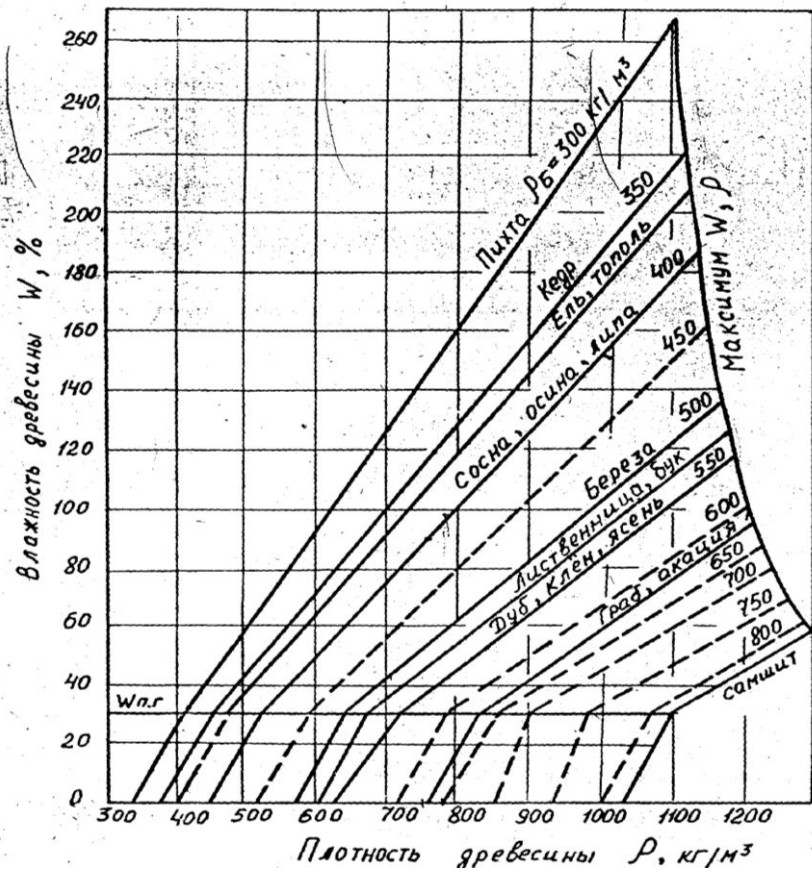


Рис. 2.3. Диаграмма плотности древесины

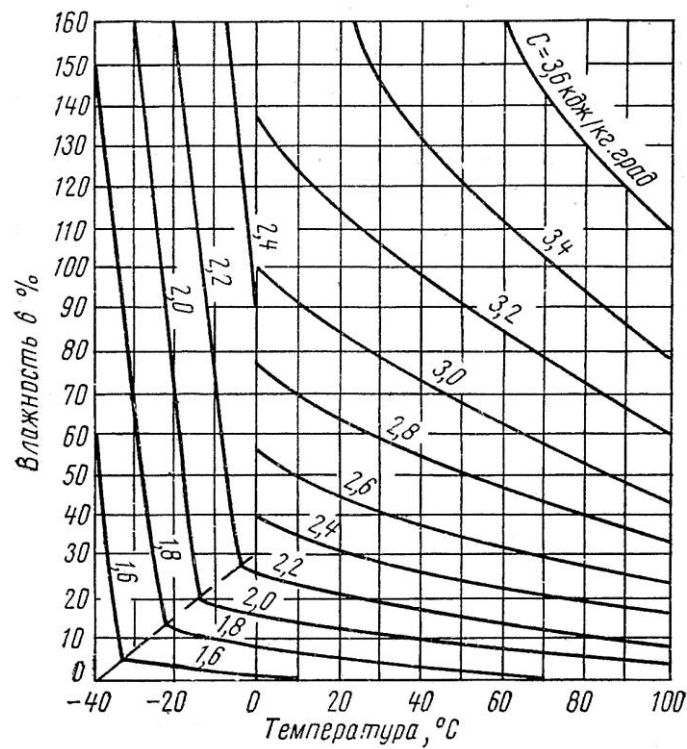


Рис. 2.4. Диаграмма удельной теплоемкости древесины

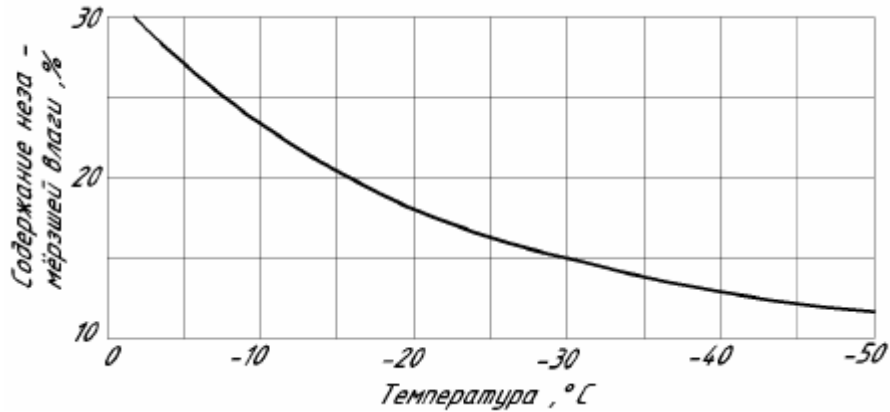


Рис. 2.5. График относительного содержания в древесине незамерзшей связанной влаги

Расход тепла на прогрев древесины, имеющей положительную начальную температуру  $Q_{np.1м^3}$ , кДж/м<sup>3</sup>, определяют по формуле

$$Q_{np.1м^3} = \rho c_{(+)}(t_{np} - t_0), \quad (2.26)$$

где  $t_0$  – начальная температура древесины, °C;

$c_{(+)}$  – удельная теплоемкость древесины, кДж/(кг·град), определяемая при расчетной температуре  $t_p = \frac{t_0 + t_{np}}{2}$ .

Удельный расход тепла при прогреве древесины в расчете на 1 кг испаряемой влаги  $q_{np}$ , кДж/кг, устанавливают для зимних и среднегодовых условий по формуле

$$q_{np} = \frac{Q_{np.1м^3}}{M_{1м^3}}. \quad (2.27)$$

Общий расход тепла на камеру при начальном прогреве, кВт (рассчитывается только для зимних условий):

$$Q_{np} = \frac{Q_{np.1м^3} E_{np}}{3600 \tau_{np}}, \quad (2.28)$$

где  $E_{np}$  – объем одновременно прогреваемых в камере пиломатериалов, м<sup>3</sup>;

$\tau_{np}$  – продолжительность прогрева, ч (принимается ориентировочно для прогрева древесины в зимних условиях 2 ч на 1 см толщины доски, летом – 1 – 1,5 ч на 1 см толщины доски)

### 2.5.2. Расход тепла на испарение влаги

Расход тепла на испарение влаги определяют для зимних и среднегодовых условий.

Удельный расход тепла на испарение влаги с учетом затрат на подогрев свежего воздуха  $q_{исп}$ , кДж/кг, при низкотемпературном процессе определяют по формуле

$$q_{исп} = 1000 \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} - c_v t_m, \quad (2.29)$$

где  $I_2$ ,  $d_2$  – соответственно теплосодержание, кДж/кг, и влагосодержание, г/кг, отработавшего удаляемого из камеры агента сушки;

$I_0$ ,  $d_0$  – соответственно теплосодержание, кДж/кг, и влагосодержание, г/кг, свежего поступающего в камеру воздуха;

$c_v$  – удельная теплоемкость воды, равная 4,19 кДж/(кг·град);

$t_m$  – температура смоченного термометра, °С.

Тепловая мощность, необходимая для испарения из материала влаги, кВт (рассчитывается только для зимних условий):

$$Q_{исп} = \frac{q_{исп} M_p}{3600}. \quad (2.30)$$

### 2.5.3. Расход тепла на компенсацию тепловых потерь через ограждения камеры

Тепловая энергия, затраченная на компенсацию тепловых потерь через ограждения камеры, равна сумме тепловых потерь через охлаждающиеся элементы ограждений камеры.

На рис. 2.6 схематично показана камера периодического действия с внутренними размерами  $L$  (длина),  $B$  (ширина) и  $H$  (высота); размеры дверей камеры  $b$  (ширина) и  $h$  (высота).

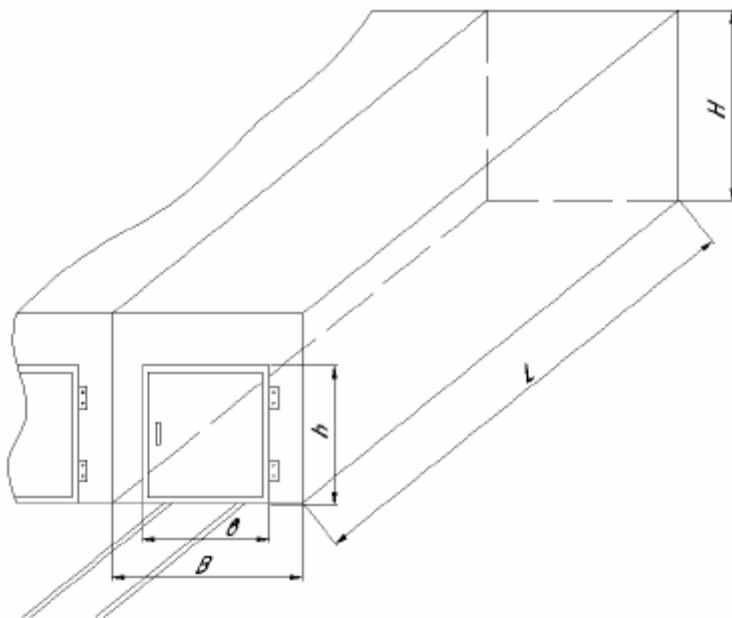


Рис. 2.6. Схема к расчёту потерь тепла через ограждения сушильной камеры (общий вид может отличаться в зависимости от задания)

При расчете тепловых потерь учитывают потоки тепла через ограждения и полы лесосушильных камер. Потери через боковые стены, разделяющие смежные камеры, не учитываются. Исключением является расчёт

теплопотерь для сборно-металлических камер, которые устанавливаются отдельно одна от другой.

Расчёт тепловых потерь удобно вести в табличной форме, предварительно составив планировку блока камер и конструктивную схему камеры с размерами элементов её ограждений (табл. 2.5 – 2.6).

Таблица 2.5

Расчёт поверхности ограждений сушильной камеры

№ п/п	Ограждение	Формула	Площадь, м <sup>2</sup>
1	Наружная боковая стена	$F_{бок} = LH$	
2	Торцовая стена	$F_{торц} = BH$	
3	Дверь	$F_{дв} = bh$	
4	Торцовая стена (за вычетом дверей)	$F_{торц2} = F_{торц} - F_{дв}$	
5	Перекрытие (потолок)	$F_{пер} = BL$	
6	Пол	$F_{пол} = BL$	

Таблица 2.6

Расчёт тепловых потерь через ограждения камеры

Ограждений	$F_{огр}, м^2$	$k, \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$	$t_k, ^\circ C$	$t_{нар}, ^\circ C$		$t_k - t_{нар}, ^\circ C$		$Q_{огр}, кВт$	
				зимняя	среднегодовая	зимняя	среднегодовая	зимняя	среднегодовая
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Итого:								$\Sigma Q_{огр}$	$\Sigma Q_{огр}$

*Примечание.* В таблице графы 5 – 6, 7 – 8 и 9 – 10 не разделяются, если камера находится в отапливаемом помещении.

Расчётную температуру  $t_{нар}$  рекомендуется принять:

- если камеры устанавливаются на улице – согласно табл. 2.3;
- если камеры устанавливаются внутри сушильного цеха – температура наружной среды для всех ограждений, кроме пола, берётся одинаковой: 15 – 20 °С, для пола 8 – 12 °С.

Температуру среды в камере  $t_k$  следует принимать равной температуре агента сушки, соответствующей расчетной ступени режима.

Для расчета потерь тепла через ограждения (кроме пола) камер  $Q_{огр}$ , кВт, рекомендуется формула

$$Q_{огр} = 1,5 \sum F_j k_j (t_k - t_{нар}) 10^{-3}, \quad (2.31)$$

где  $F_j, k_j$  – площадь, м<sup>2</sup>, и коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·град), j-го элемента ограждения;

$t_k, t_{нар}$  – температура среды внутри и снаружи камеры около j-го элемента ограждения, °С.

Тепловые потери через пол лесосушильной камеры малой мощности (ширина камеры  $b \leq 4$  м), расположенной непосредственно на грунте  $Q_{пол}$ , кВт, определяют по формуле

$$Q_{пол} = 4 \cdot 10^{-4} F_{пол} (t_k - t_{нар}), \quad (2.32)$$

При расчете расхода тепла на компенсацию тепловых потерь в камерах периодического действия температуру среды в камере  $t_k$  следует принимать равной температуре агента сушки, соответствующей расчетной степени режима.

Величина коэффициента теплопередачи многослойных ограждений  $k$  зависит от толщины ограждения и материалов многослойной конструкции. В табл. 2.7 приведены ориентировочные значения коэффициента  $k$  теплопередачи через ограждающие конструкции камер различного исполнения.

Суммарные потери тепла через ограждения и полы камер  $Q_{ном}$ , кВт, определяются по формуле

$$Q_{ном} = Q_{огр} + Q_{пол}. \quad (2.33)$$

Величину удельных потерь (на 1 кг испаряемой влаги)  $q_{ном}$ , кДж/кг, рассчитывают по формуле

$$q_{ном} = \frac{3600 Q_{ном}}{M_{ср.ч}}. \quad (2.34)$$

Таблица 2.7

Коэффициенты  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·град), теплопередачи ограждений некоторых лесосушильных камер

Тип ограждения	Значение коэффициента $k$
Ограждения стационарных камер периодического действия в железобетонном исполнении	0,8
Ограждения сборно-металлических камер периодического действия с заполнением минеральной ватой с двусторонней обшивкой металлическим листом	0,7
Двери одинарные с двусторонней обшивкой металлическим листом и с заполнением внутреннего пространства минеральной ватой	0,9

Полный удельный расход тепла на сушку пиломатериалов  $q_{суш}$ , кДж/кг, подсчитывают для зимних и среднегодовых условий и складывают из отдельных статей затрат:

$$q_{суш} = (q_{пр} + q_{исп} + q_{ном}) c_1. \quad (2.35)$$

где  $c_1$  – коэффициент, учитывающий дополнительные неучтенные расходы тепла на влаготеплообработку, подогрев камеры, транспортных средств, оборудования и пр. (принимают для зимних условий  $c_1 = 1,3$ ; для среднегодовых условий  $c_1 = 1,1$ ).

В расчёте на 1 м<sup>3</sup> высушиваемых пиломатериалов расход теплоты, ГДж/м<sup>3</sup>, определяют по выражению (для среднегодовых условий)

$$Q_{\text{суш1м}^3} = q_{\text{суш}} M_{1\text{м}^3} \cdot 10^{-6}. \quad (2.36)$$

Этот показатель используют в основном при технико-экономических расчётах, нормировании расхода тепла на камерную сушку пиломатериалов.

## 2.6. Выбор типа и расчёт поверхности нагрева калориферов

Агент сушки нагревают в рекуперативных поверхностных нагревателях, именуемых калориферами. Они относятся к основному виду теплового оборудования и во многом определяют энергетические и экономические показатели лесосушильных камер.

Ранее в камерах довольно широко применялись калориферы из гладких (обычных и биметаллических) труб, а также труб с накатными алюминиевыми ребрами. Однако в последние годы наиболее широко применяются стандартные металлические пластинчатые калориферы.

По виду теплоносителя заводы изготавливают **водяные** и **паровые** калориферы. Паровые калориферы изготавливаются только в одноходовом исполнении (рис. 2.7, а) с вертикальным расположением трубок. Водяные калориферы имеют многоходовое исполнение (рис. 2.7, б), которое реализуется путём установки перегородок в коллекторах. Трубки в них располагаются горизонтально, а патрубки – на одном коллекторе.

Одноходовые калориферы могут быть водяными, но воду в этом случае следует подавать снизу вверх при скорости её движения не менее 0,25 м/с.

По ходу движения сушильного агента в калориферах может быть установлено от 1 до 4 рядов труб.

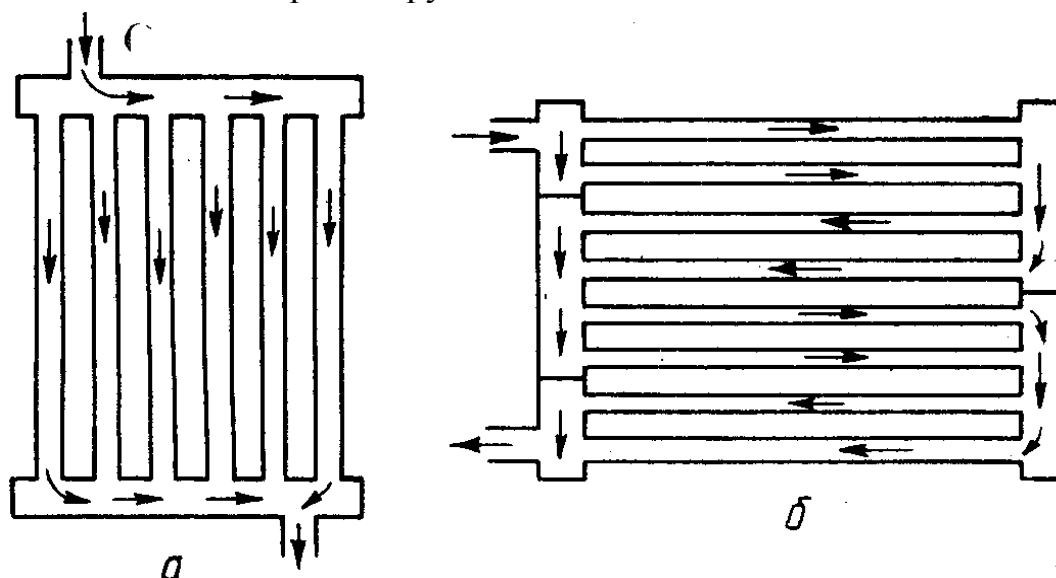
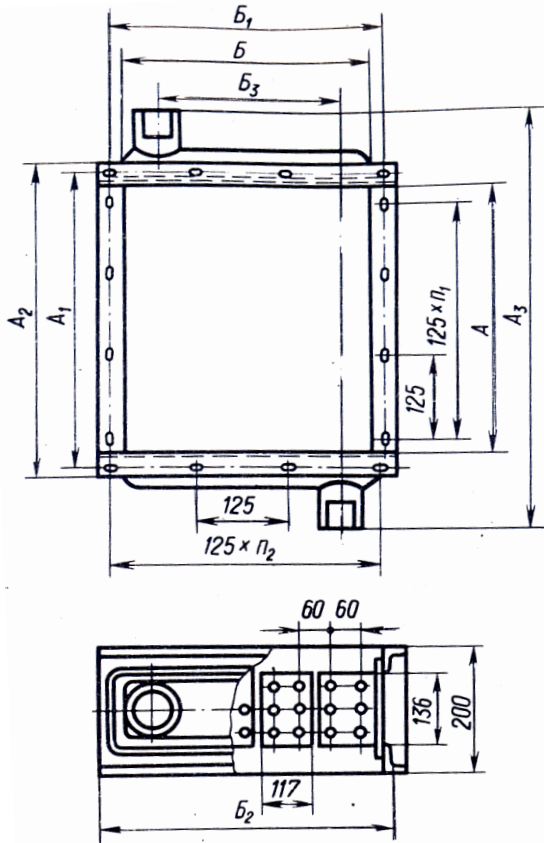


Рис. 2.7. Характер движения теплоносителя в одноходовом (а) и многоходовом (б) калориферах

При подборе калориферов для конкретной сушильной камеры необходимо знать их габаритные размеры, площади поверхности нагрева,

фронтальных (живых) сечений по воздуху и теплоносителю, массу, диаметр патрубков. Эти показатели устанавливаются заводами-изготовителями и приводятся в технических условиях и каталогах этих предприятий. Кроме того, требуется рассчитать коэффициент теплопередачи калорифера и его аэродинамическое сопротивление.



Конструктивные размеры калориферов различных марок и серий приведены в табл. 2.8 и 2.9, а их технические характеристики – в табл. 2.10 и 2.11.

Пример конструктивного исполнения пластинчатого калорифера приведен на рис. 2.8.

Рис. 2.8 Конструкция калорифера КЗПП

Таблица 2.8

Конструктивные размеры многоходовых калориферов, мм

Номер калорифера	Размеры по рис. 2.4						Грубая резьба штуцера, дюймы	Число шагов	
	A	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>		n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>
Калориферы КВС – П									
9	905	953	985	503	551	575	1 ¼	7	3
10	1155	1203	1235	503	551	575	1 ¼	9	3
11	1655	1703	1735	1003	1051	1075	2	13	7
12	1655	1703	1735	1503	1051	1575	2	13	11
Калориферы КМС, КМБ									
8	1010	1050	1074	720	760	790	2 ½	6	7
9	1010	1050	1074	840	880	910	2 ½	7	7
10	1160	1200	1224	840	880	910	2 ½	7	9
11	1160	1200	1224	960	1010	1040	3	8	9

Примечание. Калориферы КМС и КМБ № 8...11 имеют 8 ходов по воде.



Таблица 2.9

Конструктивные размеры одноходовых калориферов, мм

Номер калорифера	Размеры по рис. 2.4								Трубная резьба штуцера, дюймы	Число шагов	
	A	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	Б	Б <sub>1</sub>	Б <sub>2</sub>	Б <sub>3</sub>		n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>
Калорифер КВБ											
5	710	750	774	930	600	640	662	520	2	5	5
6	860	900	924	1000	660	640	662	520	2	5	6
7	860	900	924	1100	720	760	782	630	2 ½	6	6
8	1010	1050	1074	1250	720	760	782	630	2 ½	6	7
9	1010	1050	1074	1250	840	880	902	750	2 ½	7	7
10	1160	1200	1224	1400	840	880	902	750	2 ½	7	9
11	1160	1200	1224	1400	960	1010	1032	870	3	8	9
12	1310	1350	1380	1550	960	1010	1032	870	3	8	10
13	1310	1350	1380	1550	1080	1130	1152	990	3	9	10
14	1460	1500	1530	1700	1080	1130	1152	990	3	9	11
Калориферы КЗПП, К4ПП											
5	716	750	804		600	640	667		2	4	5
6	866	900	954		600	640	667		2	4	7
7	866	900	954		720	760	787		2 ½	5	7
8	1016	1050	1104		720	760	787		2 ½	5	8
9	1016	1050	1104		840	880	907		2 ½	6	8
10	1166	1200	1254		840	880	907		2 ½	6	9
11	1166	1200	1254		960	1010	1037		2 ½	7	9
Калорифер СТД-3009В											
Б – 5	710	750	790		600	640	660		1 ¼	4	5
Б – 6	860	900	940		600	640	666		1 ¼	4	6
Б – 7	860	900	940		720	760	786		2	5	6
Б – 8	1010	1050	1090		720	760	786		2	5	8
Б – 9	1010	1050	1090		840	880	906		2	6	8
Б – 10	1160	1200	1240		840	880	906		2	6	9
Б – 11	1160	1200	1240		960	1010	1028		2	7	9
Б – 12	1310	1350	1380		960	1010	1028		2	7	10
Б – 13	1310	1350	1390		1080	1130	1146		2	7	10
Б – 14	1460	1500	1540		1080	1130	1146		2	7	11

Таблица 2.10

Технические характеристики многоходовых калориферов

Номер калорифера	Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup>	Площадь живого сечения, м <sup>2</sup>		Номер калорифера	Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup>	Площадь живого сечения, м <sup>2</sup>	
		по воздуху	по теплоносителю			по воздуху	по теплоносителю
Калорифер КВС – П				Калорифер КМС			
9	19,56	0,238	0,001159	8	35,7	0,416	0,00114
10	25,08	0,303	0,001159	9	41,6	0,486	0,00133
11	72,00	0,867	0,002316	10	47,8	0,558	0,00133
12	108,00	1,299	0,003474	11	54,6	0,638	0,00152
Калорифер КВБ – П				Калорифер КМБ			
9	26,00	0,238	0,001544	8	45,7	0,416	0,00152
10	33,34	0,303	0,001544	9	53,3	0,486	0,00178
11	95,03	0,867	0,003089	10	61,2	0,558	0,00178
12	143,50	1,239	0,004682	11	69,9	0,638	0,00203

Таблица 2.11

Технические характеристики одноходовых калориферов

Номер калорифера	Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup>	Площадь живого сечения, м <sup>2</sup>		Номер калорифера	Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup>	Площадь живого сечения, м <sup>2</sup>	
		по воздуху	по теплоносителю			по воздуху	по теплоносителю
Калорифер КВБ				Калорифер К4ПП			
5	20,9	0,244	0,0076	5	26,8	0,244	0,0102
6	25,3	0,295	0,0076	6	32,4	0,295	0,0102
7	30,7	0,354	0,0092	7	38,9	0,354	0,0122
8	35,7	0,416	0,0092	8	45,7	0,416	0,0122
9	41,6	0,486	0,0107	9	53,3	0,486	0,0143
10	47,8	0,558	0,0107	10	61,2	0,558	0,0143
11	54,6	0,638	0,0122	11	69,9	0,638	0,0163
12	61,6	0,720	0,0122	Калорифер STD-3009В			
13	69,3	0,810	0,0138	Б – 5	20,4	0,272	0,008
14	77,3	0,330	0,0138	Б – 6	24,2	0,323	0,008
Калорифер К3ПП				Б – 7	29,1	0,388	0,0096
5	20,9	0,244	0,0076	Б – 8	34,3	0,457	0,0096
6	26,3	0,295	0,0076	Б – 9	40,5	0,533	0,0112
7	30,4	0,354	0,0092	Б – 10	46,8	0,611	0,0112
8	35,7	0,416	0,0092	Б – 11	52,5	0,700	0,0128
9	41,6	0,486	0,0107	Б – 12	58,8	0,785	0,0128
10	47,8	0,558	0,0107	Б – 13	67,1	0,883	0,0144
11	54,6	0,638	0,0122	Б – 14	74,2	0,990	0,0144

Тепловая мощность калорифера, т.е. количество передаваемой им в единицу времени тепловой энергии, кВт, определяется расходом тепла на сушку в единицу времени для зимних условий:

$$Q_k = 1,15(Q_{исп} + Q_{ном}). \quad (2.37)$$

**В зависимости от типа** теплоносителя, применяемого в сушильной камере, определяется его расход.

Максимальный расход пара на сушку  $Q_{пар.суш}^{max}$ , кг/ч, составит:

$$Q_{пар.суш}^{max} = \frac{3600Q_k}{r_{н.о}}, \quad (2.38)$$

где  $r_{н.о}$  – удельная теплота парообразования, кДж/кг (см. прил. 8).

Максимальный расход горячей воды на сушку  $Q_{вода.суш}^{max}$ , кг/ч, составит

$$Q_{вода.суш}^{max} = \frac{859,19 \cdot Q_k}{t_{ex} - t_{вых}}, \quad (2.39)$$

где  $t_{ex}$  – температура горячей воды на входе в калориферы, °С;

$t_{вых}$  – температура горячей воды на выходе из калориферов, °С.

*Примечание.* В случае применения водогрейных котлов, работающих при атмосферном давлении, с достаточной для расчетов точностью можно принимать  $t_{ex} = 95$  °С,  $t_{вых} = 75$  °С.

Далее для расчётов необходимо предварительно выбрать модель и номер калорифера, планируемого к установке. Выбор осуществляется в зависимости от типа теплоносителя и размеров канала, в котором будут установлены калориферы. На схеме камеры необходимо изобразить предварительную компоновку калориферов.

Коэффициент теплопередачи калорифера (**при водяном обогреве**)  $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·град), отнесенный к полной внешней поверхности нагрева, определяется по формуле

$$K = A(p_2 w_2)^n w_1^m, \quad (2.40)$$

где  $p_2 w_2$  – массовая скорость воздуха в живом сечении калорифера, кг/(м<sup>2</sup>·с) ( $p_2 w_2 = 4...12$  кг/(м<sup>2</sup>·с);

$w_1$  – скорость воды в трубках, м/с (2.41);

$A$  – коэффициент, величина которого указана в табл. 2.12;

$n, m$  – показатели степени, величины которых даны в табл. 2.12.

Таблица 2.12

Значения постоянных в уравнении (2.40)

Модель калорифера	$w_1 < 0,25$ м/с			$w \geq 0,25$ м/с		
	A	n	m	A	n	m
КВБ	21,52	0,275	0,192	17,8	0,343	0,149
КЗПП, КМС	16,4	0,289	0,158	12,9	0,393	0,106
К4ПП, КМБ	24,34	0,331	0,14	11,04	0,446	0,034
КВС-П	20,86	0,32	0,132	20,86	0,32	0,132
КВБ-П	19,77	0,32	0,13	19,77	0,32	0,13
СТД-3009В	18,96	0,302	0,149	15,35	0,371	0,081

Скорость воды в трубках калорифера, м/с, вычисляют как

$$w_1 = \frac{Q_{\text{вода.суш.}}^{\max}}{3600 \rho_{\text{в}} f_{\text{ж.с.к. (тепл)}}}, \quad (2.41)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>, можно принять  $\rho_{\text{в}} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;

$f_{\text{ж.с.к. (тепл)}}$  – площадь живого сечения калорифера по теплоносителю (см. табл. 2.10 – 2.11).

**При паровом обогреве** коэффициент теплопередачи  $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·град), калорифера вычисляют как

$$K = 17,8(p_2 w_2)^{0,351}. \quad (2.42)$$

**Аэродинамическое сопротивление**  $\Delta h_{\text{к}}$ , Па, калориферов может быть определено по формуле

$$\Delta h_{\text{к}} = B(p_2 w_2)^R, \quad (2.43)$$

в которой:

- для калориферов КВБ:  $B = 1,5$ ;  $R = 1,69$ .
- для калориферов КЗПП, КМС:  $B = 1,2$ ;  $R = 1,76$ .
- для калориферов К4ПП, КМБ:  $B = 1,72$ ;  $R = 1,72$ .
- для калориферов СТД-3009В:  $B = 1,48$ ;  $R = 1,73$ .

Необходимую поверхность нагрева калорифера  $F_{\text{к}}$ , м<sup>2</sup>, определяют по формуле

$$F_{\text{к}} = \frac{1,2Q_{\text{к}}}{K(t_{\text{T}} - t_{\text{с}})} 10^3, \quad (2.44)$$

где  $t_{\text{T}}$  – температура теплоносителя, °С (для воды  $t_{\text{T}} = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2}$ , для пара – табл. 2.13);

$t_{\text{с}}$  – температура среды в камере ( $t_{\text{с}} = \frac{t_1 + t_2}{2}$ ), °С.

Далее, приняв ориентировочно массовую скорость сушильного агента в живом сечении калорифера  $p_2 w_2 = 4...12$  кг/(м<sup>2</sup>·с), определяют необходимую площадь живого сечения калорифера  $f_2$ , м<sup>2</sup>

$$f_2 = \frac{G_2}{3600 p_2 w_2}, \quad (2.45)$$

где  $G_2$  – количество нагреваемого сушильного агента, кг/ч ( $G_2 = G_{\text{шт}}$ ).

Таблица 2.13

Зависимость температуры и плотности насыщенного водяного пара от давления

Параметры теплоносителя	Давление пара, Мпа				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Температура пара $t_{\text{T}}$ , °С	99,6	120	133	144	152
Плотность пара $\rho_{\text{п}}$ , кг/м <sup>3</sup>	0,59	1,13	1,62	2,12	2,62
Плотность воды (конденсата) $\rho_{\text{к}}$ , кг/м <sup>3</sup>	958	945	934	925	916

Для принятия окончательного решения об установке в камеру той или иной модели калориферов необходимо сравнить полученные расчётные значения с фактическими характеристиками предварительно выбранной модели. При сравнении характеристик могут возникнуть следующие ситуации:

– расчётные значения превышают табличные (в камеру необходимо установить несколько калориферов, соединив их параллельно, если установка нескольких калориферов не предусмотрена компоновочной схемой, выбирают другую модель калорифера и расчёт проводят повторно);

– расчётные значения меньше табличных (небольшое превышение можно принять в качестве запаса мощности, если же компоновочной схемой предусмотрена установка нескольких калориферов и фактические характеристики будут в разы больше расчётных, то необходимо принять другой менее мощный калорифер и выполнить расчёт повторно).

После принятия окончательного решения о выборе модели калорифера необходимо зафиксировать его записью: «Принимаю к установке ... калориферов марки ...»).

Затем подсчитывают действительную массовую скорость сушильного агента в живом сечении калорифера  $(p_2 w_2)_o$ , кг/(м<sup>2</sup>·с).

$$(p_2 w_2)_o = \frac{G_2}{3600 f_\phi}, \quad (2.46)$$

где  $f_\phi$  – фактическая площадь живого сечения калорифера, м<sup>2</sup>.

## 2.7. Расчёт диаметров трубопроводов

Трубопроводы в сушильном цехе предназначены для передачи теплоносителя от котельной к калориферам сушильной камеры.

Расчёт диаметров трубопроводов проводится в зависимости от типа теплоносителя.

### 1. Теплоноситель – горячая вода

Расход воды  $W_k$ , м<sup>3</sup>/с, проходящей через калориферы одной камеры:

$$W_k = w_1 f_{ж.с.к.(тепл)} n, \quad (2.47)$$

где  $w_1$  – скорость воды в трубках калорифера, м/с;

$f_{ж.с.к.(тепл)}$  – площадь живого сечения калорифера по теплоносителю (см. табл. 2.10 – 2.11);

$n$  – число калориферов в камере.

Трубы подвода и отвода воды, соединяющие калориферы в камере имеют одинаковый диаметр  $D_k$ , м, который определяется как

$$D_k = 1000 \sqrt{1,27 \frac{W_k}{w_{воды}}}, \quad (2.48)$$

где  $w_{воды}$  – скорость воды в подводящих (отводящих) трубах, м/с (принимается равной 1,0 – 1,5 м/с).

Трубы этого диаметра выходят из камеры в коридор управления. На подводящей трубе монтируется гидроклапан, снабжённый исполнительным механизмом для системы автоматического регулирования. На отводящей трубе устанавливается вентиль ручного управления. Также должны быть предусмотрены вентили для слива воды из системы.

Диаметр магистральных труб  $D_m$ , м (прямого и обратного коллектора) подводящих (отводящих) воду к камерам:

$$D_m = \sqrt{n \cdot D_k^2}, \quad (2.49)$$

где  $n$  – количество камер в цехе.

Диаметр труб к форсункам распыления воды для увлажнения воздуха в камере зависит от давления воды и вместимости камер и может составлять от 15 до 25 мм. Количество форсунок зависит от числа штабелей в плоскости, перпендикулярной потоку воздуха (принимается по 4 форсунки на один штабель).

Полученные расчётом диаметры труб округляются в большую сторону до величины  $D_y$ , мм (условный проход), регламентированной стандартом (ГОСТ 10704 – 76). Размеры труб даны в табл. 2.14.

Таблица 2.14

Размеры стальных труб (сортамент по ГОСТ 10704 – 76).

Параметры теплоносителя:  $P_y \leq 1,6$  МПа,  $t \leq 200$  °С

$D_y$	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350
$d_n$	18	25	32	38	45	57	76	89	108	133	159	219	273	325	377
$s$	2	2	2	2	2	3	3	3	3,5	3,5	4,5	6	6	6	6

**Примечание.**  $d_n$  – наружный диаметр трубы, мм;  $s$  – толщина стенки трубы, мм.

## 2. Теплоноситель – водяной пар

*Расчёты ведутся для зимних условий.*

Определяется расход пара на камеру:

*а) в период прогрева*

$$P_{\text{кам.пр.}} = \frac{3600(Q_{np} + \sum Q_{ocp})c_2}{i_n - i_k}, \quad (2.50)$$

где  $c_2$  – коэффициент, учитывающий потери тепла паропроводами, конденсатопроводами, конденсатоотводчиками при неорганизованном воздухообмене ( $c_2 \approx 1,25$ );

$i_n$  – энтальпия сухого насыщенного пара при определённом давлении, кДж/кг;

$i_k$  – энтальпия кипящей воды при том же давлении, кДж/кг.

Значения  $i_n, i_k$  даются в таблицах справочной литературы. Ориентировочно можно принимать  $\Delta i = i_n - i_k$  в зависимости от давления пара в кало-

рифере: при  $p = 0,2 \dots 0,25$  МПа  $\Delta i \approx 2190$  кДж/кг; при  $p = 0,3 \dots 0,5$  МПа  $\Delta i \approx 2100$  кДж/кг;

б) в период сушки

$$P_{\text{кам.суш.}} = \frac{3600(Q_{\text{исп}} + \sum Q_{\text{огр}}) \epsilon_2}{i_n - i_k}. \quad (2.51)$$

Максимальный расход пара в зимних условиях на сушильный цех:

$$P_{\text{цеха}} = n_{\text{кам.пр.}} P_{\text{кам.пр.}} + n_{\text{кам.суш.}} P_{\text{кам.суш.}}, \quad (2.52)$$

где  $n_{\text{кам.пр.}}$  – число камер, в которых одновременно идёт прогрев материала (принимается равным 1/6 от общего числа камер и не менее одной при любом малом числе камер);

$n_{\text{кам.суш.}}$  – остальные камеры цеха, в которых идёт процесс сушки.

Диаметр главной паровой магистрали, м

$$d_{\text{маг}} = \sqrt{1,27 \frac{P_{\text{цеха}}}{3600 \rho_n v_n}}, \quad (2.53)$$

где  $\rho_n$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup> (в зависимости от давления пара определяется по табл. 2.13);

$v_n$  – скорость движения пара, м/с (принимается для магистралей 50–80 м/с).

Диаметр паропровода (отвода) к коллектору камеры, м:

$$d_{\text{кам}} = \sqrt{1,27 \frac{P_{\text{кам.пр.}}}{3600 \rho_n v_n}}, \quad (2.54)$$

где  $v_n$  – скорость движения пара (принимается для отводов 40–50 м/с).

Диаметр паропровода к калориферу камеры, м:

$$d_{\text{калор}} = \sqrt{1,27 \frac{P_{\text{кам.суш.}}}{3600 \rho_n v_n}}, \quad (2.55)$$

где  $v_n$  – скорость движения пара, м/с (принимается 25–40 м/с).

Диаметр паропровода к увлажнительным трубам, м:

$$d_{\text{увл}} = \sqrt{1,27 \frac{P_{\text{кам.пр.}} - P_{\text{кам.суш.}}}{3600 \rho_n v_n}}, \quad (2.56)$$

где  $v_n$  – скорость движения пара, м/с (принимается 50–60 м/с).

Увлажнительные трубы в камере обычно имеют  $d_{\text{увл}} \approx 40 \dots 50$  мм.

Диаметр конденсационного трубопровода от калорифера камеры, м:

$$d_{\text{конд}} = \sqrt{1,27 \frac{P_{\text{кам.суш.}}}{3600 \rho_k v_k}}, \quad (2.57)$$

где  $\rho_k$  – плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup> (выбирается в зависимости от давления в трубопроводе по табл. 2.13);

$v_k$  – скорость движения конденсата, м/с (принимается 0,5–1,0 м/с).

Диаметр конденсационной магистрали, м:

$$d_{\text{конд.маг}} = \sqrt{1,27 \frac{P_{\text{кам.суш}} n_{\text{кам}}}{3600 \rho_k v_k}}, \quad (2.58)$$

где  $n_{\text{кам}}$  – количество камер в цехе;

$v_k$  – скорость движения конденсата, м/с (принимается 1,0–1,5 м/с).

Рассчитанные значения диаметров труб сравниваются со стандартными диаметрами (условным проходом) и принимаются ближайšie большие значения по ГОСТ 3262-75 «Трубы стальные водогазопроводные» (стандартные значения условного прохода труб, мм: 6, 8, 10, 15, 20, 25, 32, 40, 50, 65, 80, 90, 100, 125, 150).

*После каждого расчётного диаметра должно быть написано: «Принимаю  $d_{\dots} = \dots$  мм».*

## 2.8. Выбор конденсатоотводчиков

В лесосушильных камерах для удаления конденсата из калорифера используются конденсатоотводчики.

*Конденсатоотводчики монтируются на отводящих трубах калориферов только при паровом теплоснабжении сушильных камер!*

**Конденсатоотводчик** – устройство, которое обеспечивает отвод конденсата из паровой среды за счёт разницы скоростей пара и конденсата при протекании в зазоре между седлом и диском.

Устройство осуществляет отвод конденсата, не участвующего в технологическом процессе. Позволяет сохранять тепловую мощность и качество пара, экономить до 90 % тепловой энергии в теплопотребляющих установках (за счёт ликвидации "пролетного" пара). Кроме того, конденсатоотводные устройства позволяют минимизировать риск возникновения гидроударов, способных привести к повреждениям элементов трубопровода.

Производственные испытания показали, что наилучшим образом для этой цели подходят термодинамические конденсатоотводчики 45ч15нж (рис. 2.9), техническая характеристика которых дана в табл. 2.15.

Выбор конденсатоотводчика производится по коэффициенту пропускной способности  $k_v$ , кг/ч:

$$k_v = \frac{20P_{\text{кам.суш}}}{c_r \sqrt{\Delta p \rho_k}}, \quad (2.59)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления в конденсатоотводчике, МПа;

$c_r$  – коэффициент, учитывающий снижение пропускной способности конденсатоотводчика при удалении горячего конденсата по сравнению с холодным, при  $\Delta p \leq 0,2$  МПа  $c_r = 0,29$ ; при  $\Delta p > 0,2$  МПа  $c_r = 0,25$ .



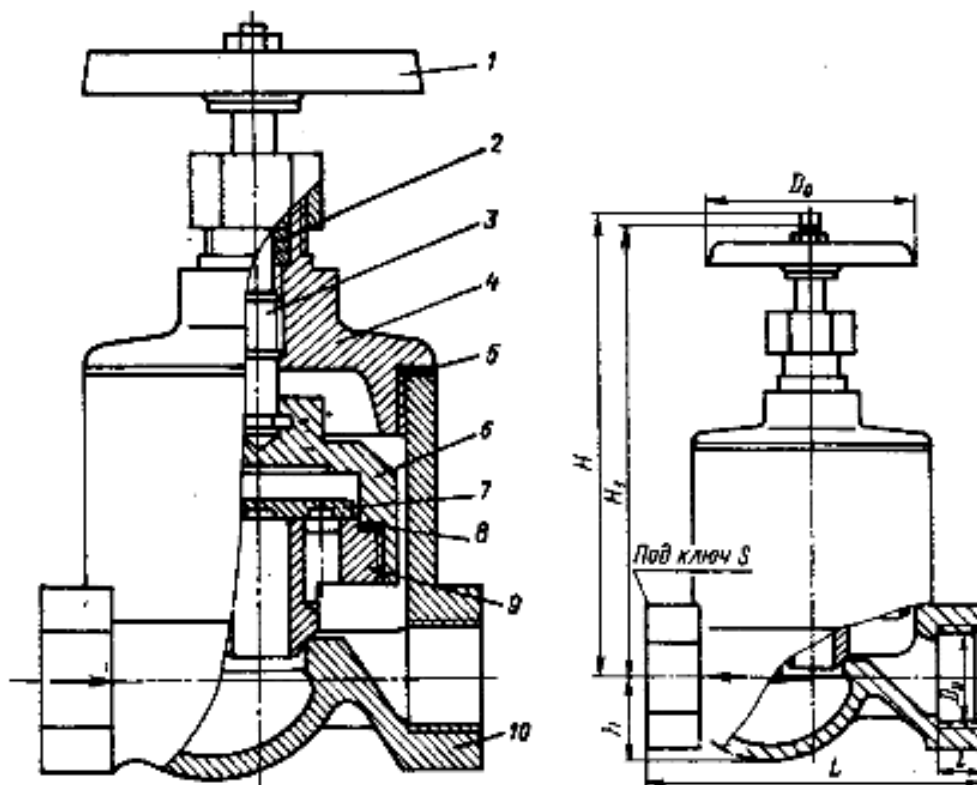


Рис. 2.9 Конденсатоотводчик термодинамический 45ч15нж:  
 1 – маховик; 2 – сальник; 3 – шпindelь; 4 – крышка; 5, 8 – прокладки;  
 6 – резьбовая втулка; 7 – тарелка; 9 – седло; 10 – корпус

Перепад давления в конденсатоотводчике

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (2.60)$$

где  $p_1$  – абсолютное давление пароводяной смеси перед конденсатоотводчиком, МПа ( $p_1 = 0,95 P$ , где  $P$  – абсолютное давление пара перед калорифером, т.е. на коллекторе камеры, МПа, см. задание);

$p_2$  – абсолютное давление конденсата после конденсатоотводчика, МПа (давление в конденсационной магистрали принимается от 0,1 до 0,2 МПа).

Таблица 2.15

Техническая характеристика  
 термодинамических конденсатоотводчиков типа 45ч15нж

Проход условный $d_y$ , мм	Коэффициент $k_v$ , кг/ч	Размеры, мм					Резьба трубная, дюйм	Масса, кг
		L	L <sub>1</sub>	H	h	D <sub>0</sub>		
15	800	90	14	192	18	65	1/2	2,45
20	1000	100	16	213	22	80	3/4	4,05
25	1250	120	18	250	28	100	1	6,55
32	1600	140	20	300	35	100	1 1/4	8,5
40	2000	170	22	310	45	120	1 1/2	13,5
50	2500	200	24	335	50	140	2	17,3

Если  $k_v$  по расчёту получается больше 2500 кг/ч, то на камеру выбирается два конденсатоотводчика по суммарной пропускной способности, близкой к расчётной.

### 3. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАМЕРЫ

#### 3.1. Определение потерь напора в кольце циркуляции

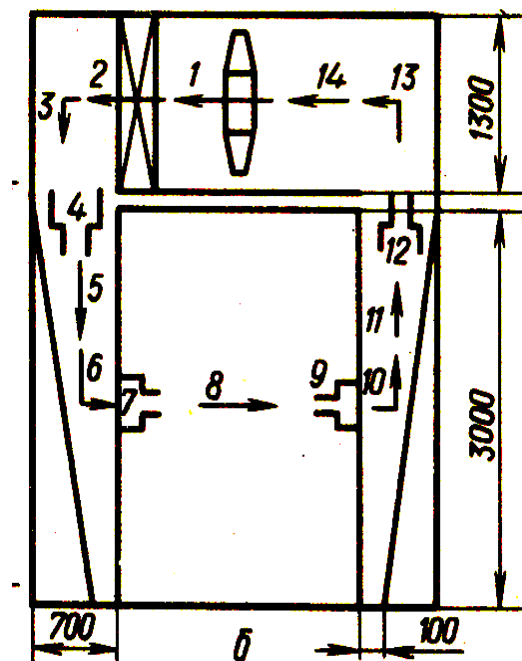
Основным требованием, предъявляемым к лесосушильным установкам, является обеспечение равномерного просыхания древесины по всему объему сушильного пространства. Для выполнения этого требования необходимы равномерное распределение сушильного агента по высоте и длине сушильного штабеля, а также значительные скорости сушильного агента по материалу, способствующие достаточно равномерному просыханию древесины по ходу движения агента сушки.

Аэродинамическая схема лесосушильной камеры определяет взаимное расположение элементов внутреннего пространства: калориферов, вентиляторов, экранов рециркуляционных каналов, приточно-вытяжных каналов, а также размеры элементов циркуляционного контура. Поэтому от аэродинамической схемы зависят качество сушки и затраты на ее осуществление.

Для выполнения дальнейших расчётов необходимо составить аэродинамическую схему сушильной камеры с обозначением всех участков сопротивления движению воздушного потока.

В зависимости от типа циркуляции камера вычерчивается в продольном или поперечном разрезе и нумеруются участки сопротивления, начиная от вентилятора. Примеры аэродинамических схем различных камер представлены на рис. 3.1 – 3.4.

*Примечание.* В расчёте необходимо вычертить схему своей камеры и расставить участки сопротивления потоку!



Исходными данными для аэродинамического расчета являются:

- 1) количество циркулирующего воздуха и его характеристика;
- 2) конструкция и сопротивление калорифера.

Рис. 3.1. Расчетная схема камеры с вертикально-поперечной циркуляцией агента сушки:

1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3, 13 – поворот под углом  $90^{\circ}$ ; 4 – сужение потока при входе в боковой канал; 5, 11 – прямой участок переменного сечения; 6, 10 – повороты под углом  $90^{\circ}$ ; 7 – вход в штабель (сужение потока); 8 – штабель; 9 – выход из штабеля (расширение потока); 12 – расширение потока при выходе из бокового канала; 14 – прямой участок

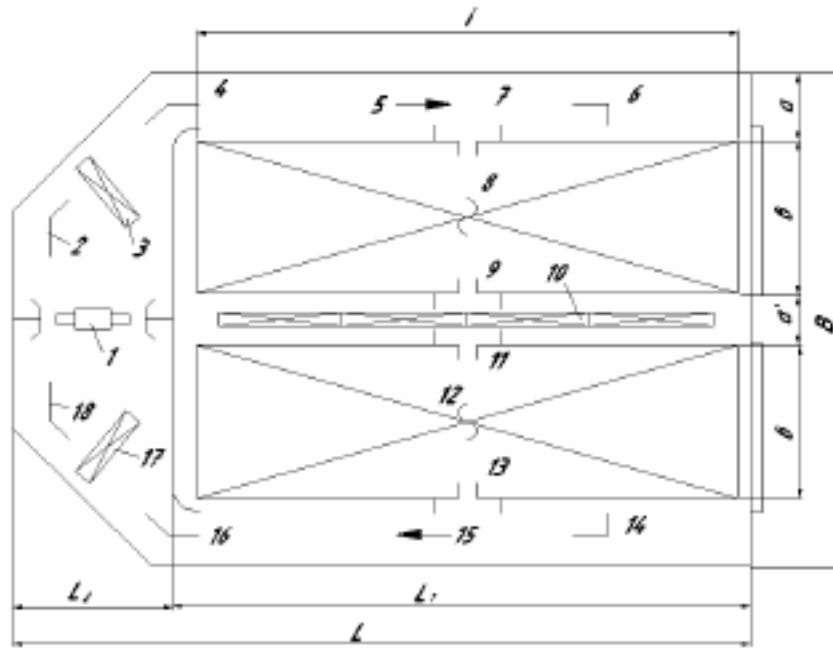


Рис. 3.2. Расчетная схема двухштабельной камеры с горизонтально-поперечной циркуляцией агента сушки:

1 – вентилятор; 2, 4, 16, 18 – повороты под углом  $135^{\circ}$ ; 3, 17 – калориферы; 5, 15 – боковые каналы; 6, 14 – повороты под углом  $90^{\circ}$ ; 7, 11 – вход в штабель (сужение потока); 8, 12 – штабель; 9, 13 – выход из штабеля (расширение потока); 10 – калориферы

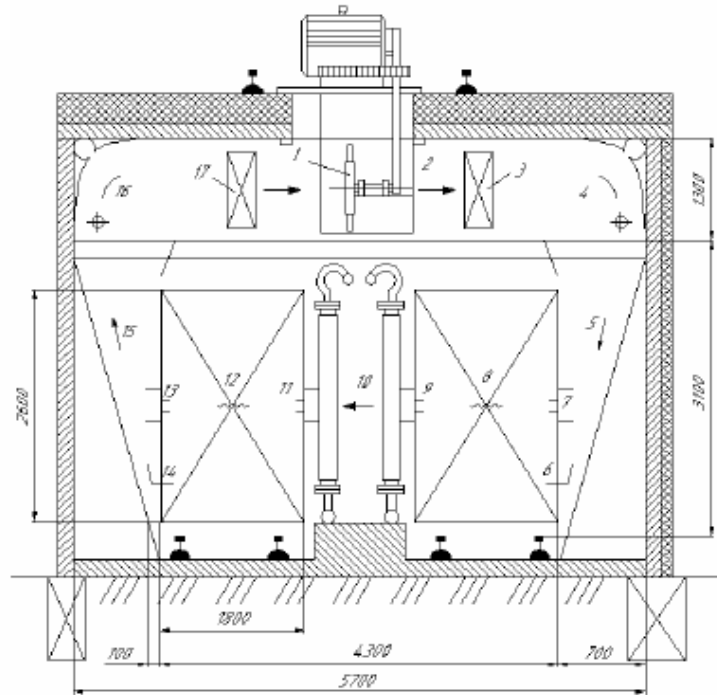


Рис. 3.3. Расчетная схема двухштабельной камеры с вертикально-поперечной циркуляцией агента сушки:

1 – вентилятор; 2 – верхний циркуляционный канал; 3, 17 – пластинчатые калориферы; 4, 16 – повороты по радиусу; 5, 15 – боковые каналы; 6, 14 – повороты под углом  $100^{\circ}$ ; 7, 11 – вход в штабель (сужение потока); 8, 12 – штабель; 9, 13 – выход из штабеля (расширение потока); 10 – ребристые трубы

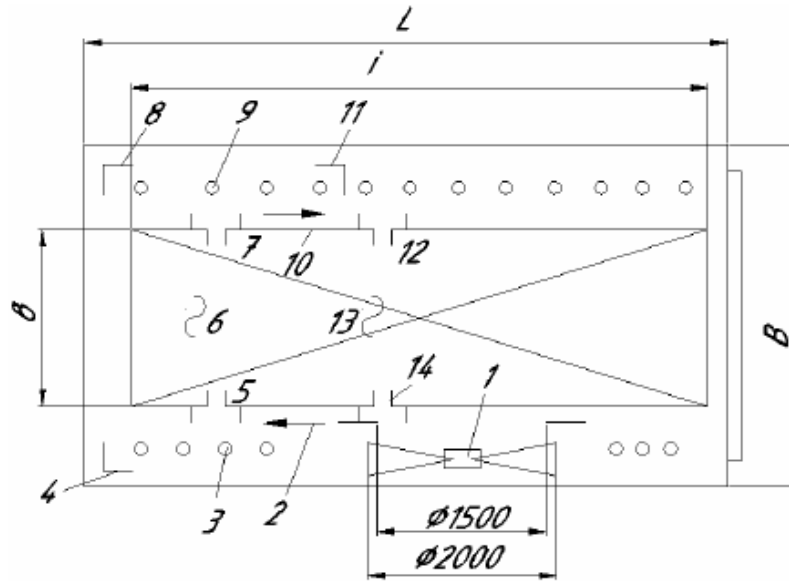


Рис. 3.4. Расчетная схема сушильной камеры с боковым расположением вентилятора:

1 – вентилятор; 2, 10 – боковые каналы; 3, 9 – калориферы; 4, 8, 11 – повороты под углом  $90^\circ$ ; 5, 12 – вход в штабель (внезапное сужение потока); 6, 13 – штабели; 7, 14 – выход из штабеля (внезапное расширение потока)

**Порядок расчета следующий.**

Определяется (согласно расчетной схеме) скорость циркуляции на отдельных участках  $\omega_{уч}$ , м/с:

$$\omega_{уч} = \frac{V_в}{3600F_{кан}}, \quad (3.1)$$

где  $V_в$  – количество агента сушки, циркулирующего в камере,  $м^3/ч$  ( $V_в = V_{шт}$ ), см. (2.9);

$F_{кан}$  – площадь канала, перпендикулярного движению агента сушки,  $м^2$ .

Расчёты скоростей циркуляции агента сушки на каждом участке рекомендуется свести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Расчёт скорости движения агента сушки в контуре циркуляции сушильной камеры

Номер участка	1	2	3	...	n
Площадь канала (живого сечения*) $F_{к}$ , $м^2$					
Скорость движения агента сушки, м/с					

\* При определении площадей каналов таких участков как «калорифер», «штабель» и т.п. принимается площадь, свободная для прохода воздуха, т.е. площадь «живого сечения» участка; при определении площади на участке «вентилятор» необходимо определить площадь окружности вентиляторов, принимая их количество и диаметр приблизительно, исходя из размеров циркуляционного канала.

Затем производится расчет потерь давления на каждом участке  $\Delta h_{уч}$ , Па:

$$\Delta h_{уч} = \frac{\rho \omega_{уч}^2 \xi}{2}, \quad (3.2)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega_{уч}$  – скорость воздуха на участках, м/с;

$\xi$  – коэффициент местного сопротивления на участках.

На прямом участке

$$\xi_{np} = \frac{k l P}{4 f}, \quad (3.3)$$

где  $k$  – коэффициент трения;

$l$  – длина участка, м;

$P$  – периметр участка, м;

$f$  – площадь сечения канала, перпендикулярного движению агента сушки, м<sup>2</sup>.

Величина коэффициента трения  $k$ :

– для металлических каналов  $k = 0,016$ ;

– для оштукатуренных каналов  $k = 0,03$ ;

– для неоштукатуренных каналов  $k = 0,04$ .

Значения коэффициентов местных сопротивлений на некоторых участках циркуляции воздуха в сушильных камерах приведены ниже.

1. Поворот потока

Угол поворота в градусах ..... 90    120    135    150

Коэффициент  $\xi$  ..... 1,10    0,55    0,25    0,20

2. Внезапное сужение потока

Отношение площадей  $f/F$ ... 0,1    0,3    0,5    0,6    0,7    0,8    0,9    1,0

Коэффициент  $\xi_{суж}$ ..... 0,29    0,25    0,18    0,13    0,08    0,04    0,01    0

3. Внезапное расширение потока

Отношение площадей

$f/F$  ..... 0,1    0,2    0,3    0,4    0,5    0,6    0,7    0,8    0,9

Коэффициент  $\xi_{расш}$  ..... 0,81    0,64    0,48    0,36    0,25    0,16    0,1    0,05    0,01

Сопротивление штабеля, уложенного на прокладках без шпаций при движении воздуха вдоль прокладок  $\Delta h_{ум}$ , Па, рассчитывают по формуле

$$\Delta h_{ум} = \frac{\rho \omega_{ум}^2 \xi_{ум}}{2}, \quad (3.4)$$

где  $\omega_{ум}$  – скорость движения воздуха перед входом в штабель, м/с;

$\xi_{ум}$  – коэффициент местного сопротивления штабеля.

$$\xi_{ум} = 2,55 \left( \frac{S}{a} \right)^{1,5} + \frac{0,03B}{a^3} (a + S)^2, \quad (3.5)$$

где  $S$  – толщина доски, мм;

$a$  – толщина прокладки, мм;

$B$  – ширина штабеля, мм.

Сопротивление перегородок, в которых монтируются осевые вентиляторы  $\Delta h_{пер}$ , Па, определяют по формуле

$$\Delta h_{пер} = \frac{\rho \omega_{вент}^2 \xi_{пер}}{2}, \quad (3.6)$$

где  $\omega_{вент}$  – скорость воздуха перед кожухом вентилятора, м/с;

$\xi_{пер}$  – коэффициент местного сопротивления (для вентиляторов на поперечных валах  $\xi_{пер} = 0,8$ ).

Сопротивление калорифера определяется по формуле (2.43) по фактическому значению  $(\rho_2 w_2)_ф$ .

Рабочее давление вентилятора  $H_{раб}$ , Па, определяется как сумма величин сопротивлений движению воздуха:

$$H_{раб} = \sum \Delta h_i. \quad (3.7)$$

Весь расчет сопротивлений целесообразно свести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Подсчет сопротивлений

Номера участков	Наименование участков	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\omega_i$ , м/с	$\xi_i$	Сопротивление участков $\Delta h_i$ , Па
...	...	...	...	...	...
					$H_{раб} = \sum \Delta h_i$

Поскольку характеристики вентиляторов составляют для воздуха при стандартных условиях ( $t = 20$  °С,  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>), расчетный напор пересчитывают в характеристический  $H_{хар}$ , Па:

$$H_{хар} = \frac{1,2 H_{расч}}{\rho}, \quad (3.8)$$

где  $\rho$  – фактическая плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

### 3.2. Подбор вентилятора

В лесосушильных камерах наибольшее распространение получили осевые вентиляторы. Это объясняется тем, что их можно устанавливать внутри циркуляционного канала и обеспечивать циркуляцию агента сушки.

Кроме того, производительность и КПД осевых вентиляторов аналогичных размеров выше, а габаритные размеры и масса меньше, чем центробежных.

Существенным преимуществом осевых вентиляторов также является реверсивность, т.е. изменение направления вращения рабочего колеса.

Основным элементом осевого вентилятора (рис. 3.5) является рабочее колесо, состоящее из втулки и лопастей, закрепленных на ней под углом к плоскости вращения. Рабочее колесо размещено внутри цилиндрического

кожуха, называемого обечайкой. Колесо устанавливается на приводном вентиляторном валу или непосредственно на валу электродвигателя в зависимости от конструкции камеры.

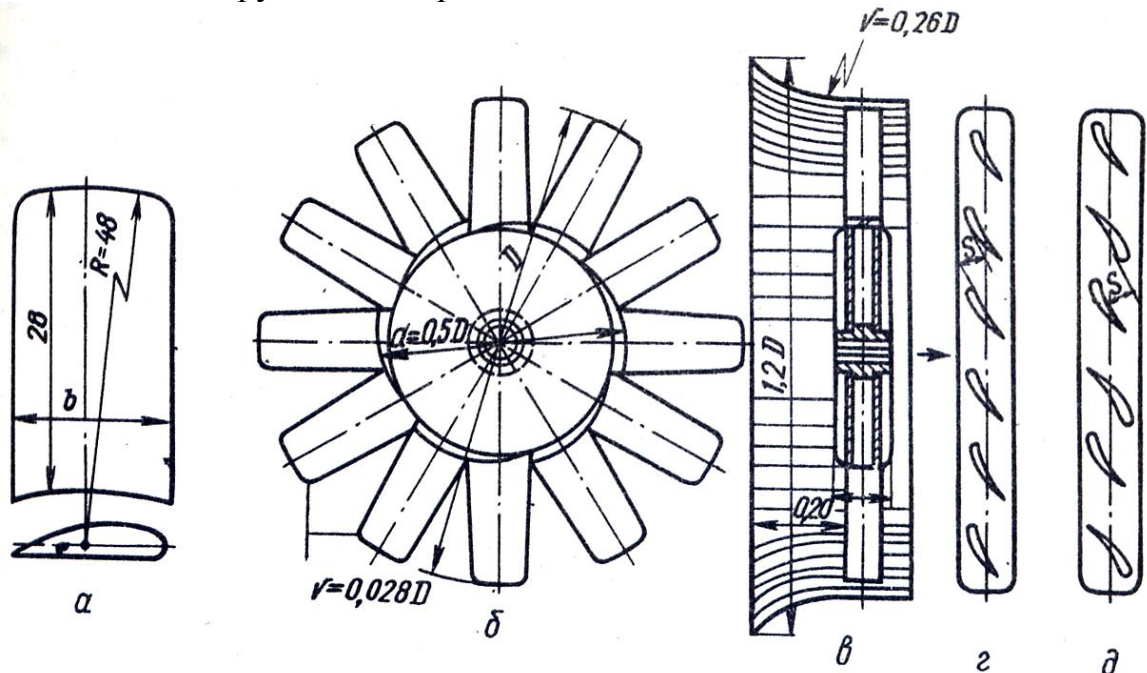


Рис. 3.5. Осевой вентилятор серии У – 12:

а – лопасть; б – рабочее колесо; в – поперечный разрез колеса и обечайки; г – развертка установки лопастей нереверсивного колеса; д - развертка установки лопастей реверсивного колеса

Размер осевого вентилятора соответствует его номеру, который обозначается числом дециметров диаметра рабочего колеса. Так, колесо диаметром 1000 мм, или 10 дм, будет № 10.

Определение номера вентилятора и частоты его вращения наиболее просто производить по графикам аэродинамической характеристики вентиляторов (рис. 3.6).

Задаваясь величиной полного давления (которое в первом приближении равно характеристическому напору  $H_{хар}$ ) и величиной производительности вентилятора (количество циркулирующего агента сушки  $V_{вент}$ ), выбирают номер вентилятора (считая ближайший справа). Если номер вентилятора не соответствует размеру циркуляционного канала камеры, можно принять вентилятор меньшего диаметра, но с большей частотой вращения.

Производительность одного вентилятора  $V_{вент}$ , м<sup>3</sup>/ч, может быть определена как

$$V_{вент} = \frac{V}{m}, \quad (3.9)$$

где  $m$  – количество вентиляторов в камере.

**Примечание.** При реализации вертикально-поперечной схемы циркуляции целесообразно устанавливать в камеру несколько вентиляторов (1

вентилятор на 2 м длины штабеля) для повышения равномерности воздушного потока по длине штабеля. При этом производительности вентиляторов складываются, а величина характеристического напора остается равной таковой для одного вентилятора. В камерах с поперечно-горизонтальной циркуляцией независимо от длины штабеля устанавливается 1 – 2 вентилятора по высоте циркуляционного канала (высота канала совпадает с высотой внутреннего пространства камеры).

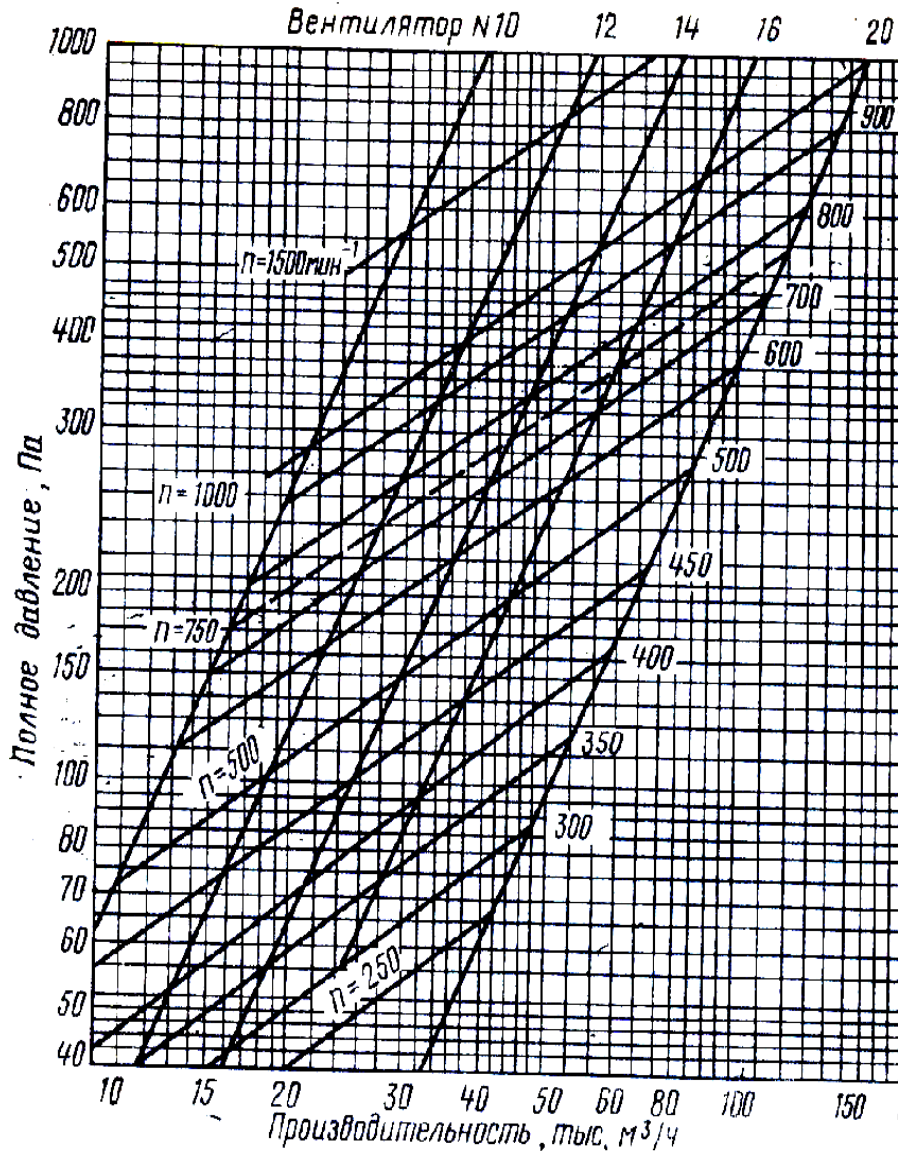


Рис. 3.6. Аэродинамическая характеристика осевых вентиляторов серии У

Мощность  $N_b$ , кВт, необходимую на привод вентилятора, определяют по формуле

$$N_b = \frac{V_{\text{вент}} H_{\text{раб}}}{1000 \eta_e \eta_n} K_t K_z, \quad (3.10)$$

где  $V_{\text{вент}}$  – производительность одного вентилятора, м³/с;

$H_{\text{раб}}$  – рабочее давление вентилятора, Па;

$\eta_e$  – КПД вентилятора (можно принять в расчетах  $\eta_e \approx 0,6$ );



$\eta_n$  – КПД передачи;

$K_t$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры среды  $t_c$ ;

$K_3$  – коэффициент запаса мощности на пусковой момент.

Значения величин в формуле (3.10) приведены ниже.

1. Значения коэффициента  $K_t$

Температура среды $t_c$ , °С .....	25...35	36...40	41...45	46...50	Более 50
$K_t$ .....	1,05	1,1	1,2	1,25	1,5

2. Значения КПД передачи  $\eta_n$

При непосредственной посадке рабочего колеса на вал электродвигателя .....	1,0
При прямом соединении муфтой вала вентилятора с валом электродвигателя .....	0,95
При клиноременной передаче .....	0,9

3. Значения коэффициента  $K_3$  (необходимо вначале посчитать  $N_g$  без коэффициента и выбрать  $K_3$ )

Мощность $N_B$ , кВт.....	До 0,5	0,5...1,0	1,0...2,0	2,0...5,0	Более 5,0
$K_3$ .....	1,2	1,15	1,1	1,08	1,05

#### 4. ПЛАНИРОВКА ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ ЦЕХОВ

Задачей планировки является взаимное размещение всех помещений сушильного цеха. Размеры и общая площадь сушильного цеха определяются выбранным типом, числом камер и количеством высушиваемого материала.

Варианты планировки лесосушильного цеха могут быть весьма разнообразными. Они зависят от особенностей генерального плана предприятия, а кроме того, от типа сушильных камер и способов формирования и перемещения штабелей.

При проектировании лесосушильных цехов площадки для формирования штабелей, помещения для хранения сырых сушильных штабелей, траверсные коридоры, остывочные помещения, склады сухих пиломатериалов должны размещаться в закрытых помещениях с отоплением, освещением и приточно-вытяжной вентиляцией.

Особое внимание при проектировании должно обращать на механизацию формирования сушильных пакетов и штабелей, их транспортирование, загрузку-выгрузку, разборку, подачу на склад и выдачу со склада сухих пиломатериалов.

После определения необходимого количества сушильных камер необходимо выбрать вспомогательное оборудование: укладчики пиломатериалов, транспортно-загрузочные механизмы [1]. Выбор типа требуемого обо-

рудования производят исходя из количества лесосушильных камер и производительности сушильного цеха.

На планировочных чертежах толщину стен стационарной камеры можно брать в среднем 500 мм и изображать схематично без указания ее конструкции. Толщина стен сборно-металлических камер составляет в среднем 120 – 150 мм. На планировочных чертежах такие камеры можно показывать схематично без разреза в виде прямоугольника со сторонами, равными габаритной ширине и длине камеры.

### Емкость и необходимая площадь складов сырых и сухих пиломатериалов

Емкость складов пиломатериалов  $E_{скл}$ ,  $m^3$ , зависит от продолжительности хранения материала  $Z_{хр}$ , сут, и среднесуточной производительности сушильного цеха  $Q_{сут}$ ,  $m^3/сут$ :

$$E_{скл} = Q_{сут} Z_{хр} . \quad (4.1)$$

Продолжительность хранения на складе  $Z_{хр}$  сырого материала принимается до двух суток, а сухого – от четырех до семи суток.

Среднесуточная производительность сушильного цеха  $Q_{сут}$ ,  $m^3/сут$ , определяется по формуле

$$Q_{сут} = \frac{Q_{суш}}{365c} , \quad (4.2)$$

где  $Q_{суш}$  – годовой объем сушки пиломатериалов на предприятии, сут;  
 $c$  – коэффициент технического использования камер ( $c = 0,92$ ).

Зная емкость склада  $E_{скл}$  и емкость штабеля  $E_{шт}$ ,  $m^3$  усл., можно определить число штабелей, подлежащих хранению на складе сырого и сухого материала  $N_{шт}$ :

$$N_{шт} = \frac{E_{скл}}{E_{шт}} . \quad (4.3)$$

Емкость штабеля  $E_{шт}$ ,  $m^3$  усл., определяется как

$$E_{шт} = \Gamma_{шт} \beta_{усл} , \quad (4.4)$$

где  $\Gamma_{шт}$  – габаритный объем штабеля,  $m^3$ ;

$\beta_{усл}$  – объемный коэффициент заполнения штабеля условным материалом.

$$\Gamma_{шт} = lbh , \quad (4.5)$$

где  $l, b, h$  – соответственно, длина, ширина и высота штабеля, м.

Для определения необходимой площади складов нужно произвести планировку расположения штабелей на складе с учетом транспортных и пожарных проходов и проездов, учитывая при этом способ хранения сухого материала (на вагонетках или в плотных штабелях). Для ориентировочных расчетов можно принять средний коэффициент заполнения площади складов материалом  $\beta_{пл.скл}$  равным 0,35 – 0,45.

Тогда площадь склада  $F_{скл}$ ,  $m^2$ , определяется по формуле

$$F_{скл} = b l N_{шт} \frac{1}{\beta_{пл.скл}}. \quad (4.6)$$

Обычно максимальная площадь склада сухого материала не превышает площади, занимаемой сушильными камерами.

В зависимости от числа камер, их размеров, а также площадей складов сырых и сухих пиломатериалов разрешаются вопросы транспортировки штабелей и планировки сушильного цеха.

### Литература

1. Серговский П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины / П.С. Серговский, А.И. Расев. М.: Лесн. пром-сть. 1987.
2. Расев А.И. Проектирование сушильных камер периодического действия / А.И. Расев, Л.П. Красухина. М.: МГУЛ, 2009. 96 с.
3. Акишенков С.И. Проектирование лесосушильных камер и цехов / С.И. Акишенков, В.И. Корнеев: учеб. пособие. СПб: СПбГЛТА. 2008. 104 с.
4. Справочник по сушке древесины / Е.С. Богданов, В.А. Козлов, В.Б. Кунтыш, В.И. Мелехов. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 304 с.
5. Богданов Е.С. Расчет, проектирование и реконструкция лесосушильных камер / Е.С. Богданов, В.И. Мелехов, В.Б. Кунтыш. М.: Экология, 1993. 352 с.
6. Гороховский А.Г. Качество сушки пиломатериалов / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина: учеб. пособие. Екатеринбург: УГЛТУ, 2008. 127 с.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

**Приложение 1**

**Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины сосны, ели, пихты, кедра**

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		Толщина пиломатериалов, мм							
		до 22	св. 22 до 25	св. 25 до 32	св. 32 до 40	св. 40 до 50	св. 50 до 60	св. 60 до 75	св. 75 до 100
<b>Мягкие режимы (М)</b>									
> 35	$t, ^\circ\text{C}$	57	57	57	55	55	55	52	52
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	6	5	4	4	4	4	3	2
	$\varphi$	0,73	0,77	0,81	0,81	0,81	0,81	0,84	0,90
35 - 20	$t, ^\circ\text{C}$	61	61	61	58	58	58	55	55
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	10	9	8	7	7	7	6	5
	$\varphi$	0,59	0,62	0,66	0,69	0,69	0,69	0,72	0,76
< 20	$t, ^\circ\text{C}$	77	77	77	75	75	75	70	70
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	26	25	24	24	24	24	21	20
	$\varphi$	0,27	0,29	0,31	0,30	0,3	0,30	0,33	0,35
<b>Нормальные режимы (Н)</b>									
> 35	$t, ^\circ\text{C}$	83	79	79	75	73	71	64	55
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	9	7	6	5	5	4	3	2
	$\varphi$	0,68	0,73	0,77	0,80	0,80	0,83	0,86	0,9
35 - 25	$t, ^\circ\text{C}$	88	84	84	80	77	75	68	58
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	14	12	11	10	9	8	7	5
	$\varphi$	0,55	0,59	0,62	0,64	0,66	0,70	0,71	0,77
< 25	$t, ^\circ\text{C}$	110	105	105	100	96	94	85	75
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	36	33	32	30	28	27	24	22
	$\varphi$	0,24	0,26	0,27	0,29	0,31	0,32	0,33	0,34
<b>Форсированные режимы (Ф)</b>									
> 35	$t, ^\circ\text{C}$	94	92	92	90	87	83	73	-
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	11	10	8	7	6	5	4	-
	$\varphi$	0,65	0,67	0,73	0,75	0,78	0,80	0,84	-
35 - 25	$t, ^\circ\text{C}$	99	97	97	95	92	88	78	-
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	16	15	13	12	11	10	9	-
	$\varphi$	0,54	0,55	0,60	0,62	0,64	0,66	0,66	-
< 25	$t, ^\circ\text{C}$	125	123	123	120	115	110	98	-
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	42	41	39	37	36	32	29	-
	$\varphi$	0,21	0,22	0,24	0,25	0,25	0,29	0,30	-

**Приложение 2**

**Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины лиственницы**

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер						
		Л1	Л2	Л3	Л4	Л5	Л6	Л7
		Толщина пиломатериалов, мм						
		до 22	св. 22 до 25	св. 25 до 32	св. 32 до 40	св. 40 до 50	св. 50 до 60	св. 60 до 75
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Нормальные режимы (Н)</b>								
> 35	$t, ^\circ\text{C}$	70	70	70	65	60	60	60
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	9	8	6	5	4	3	2
	$\varphi$	0,64	0,68	0,76	0,78	0,81	0,86	0,90
35 - 25	$t, ^\circ\text{C}$	75	75	75	70	65	65	65
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	15	15	15	10	9	7	5
	$\varphi$	0,49	0,49	0,49	0,61	0,63	0,71	0,78

Окончание прил. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
< 25	t, °C	80	80	80	75	70	70	70
	Δt, °C	26	25	25	20	19	18	15
	φ	0,28	0,29	0,30	0,38	0,37	0,39	0,47
Форсированные режимы (Ф)								
Форсированные режимы (Ф)								
> 35	t, °C	90	90	82	75	75	72	70
	Δt, °C	9	7	4	4	3	2	2
	φ	0,69	0,75	0,84	0,84	0,87	0,92	0,91
35 - 25	t, °C	98	96	87	80	80	78	76
	Δt, °C	12	11	8	8	6	5	4
	φ	0,63	0,65	0,72	0,70	0,77	0,80	0,84
< 25	t, °C	112	110	108	100	100	95	90
	Δt, °C	32	30	29	28	26	20	18
	φ	0,30	0,32	0,32	0,32	0,35	0,44	0,47

### Приложение 3

#### Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины берёзы

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер						
		Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6	Б7
		Толщина пиломатериалов, мм						
		до 22	св. 22 до 32	св. 32 до 40	св. 40 до 50	св. 50 до 60	св. 60 до 75	св. 75 до 100
Мягкие режимы (М)								
> 35	t, °C	60	60	60	58	54	48	-
	Δt, °C	8	7	6	6	5	4	-
	φ	0,65	0,69	0,73	0,73	0,76	0,79	-
35 - 25	t, °C	64	64	64	62	58	52	-
	Δt, °C	12	11	10	10	9	8	-
	φ	0,54	0,57	0,60	0,59	0,61	0,63	-
< 25	t, °C	80	80	80	78	72	64	-
	Δt, °C	28	27	26	26	23	20	-
	φ	0,25	0,27	0,28	0,27	0,30	0,32	-
Нормальные режимы (Н)								
> 35	t, °C	75	73	70	64	58	52	42
	Δt, °C	9	7	6	6	5	4	3
	φ	0,66	0,72	0,76	0,74	0,77	0,80	0,83
35 - 25	t, °C	80	77	75	68	62	54	45
	Δt, °C	14	12	11	10	9	8	6
	φ	0,53	0,58	0,61	0,61	0,62	0,64	0,69
< 25	t, °C	100	96	92	84	78	72	57
	Δt, °C	34	32	29	26	25	22	18
	φ	0,23	0,24	0,28	0,29	0,29	0,32	0,34
Форсированные режимы (Ф)								
> 35	t, °C	82	80	77	72	-	-	-
	Δt, °C	8	7	6	5	-	-	-
	φ	0,71	0,73	0,77	0,79	-	-	-
35 - 25	t, °C	86	84	80	74	-	-	-
	Δt, °C	12	11	8	7	-	-	-
	φ	0,60	0,62	0,70	0,72	-	-	-
< 25	t, °C	108	104	100	94	-	-	-
	Δt, °C	34	31	28	27	-	-	-
	φ	0,25	0,28	0,32	0,32	-	-	-

**Приложение 4**

**Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов  
из древесины ольхи, липы, тополя**

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер						
		O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
		Толщина пиломатериалов, мм						
		до 22	св. 22 до 32	св. 32 до 40	св. 40 до 50	св. 50 до 60	св. 60 до 75	св. 75 до 100
<b>Нормальные режимы (Н)</b>								
> 35	t, °C	74	70	64	62	56	52	42
	Δt, °C	6	5	4	4	3	3	2
	φ	0,76	0,79	0,82	0,82	0,84	0,84	0,89
35 - 25	t, °C	80	75	68	66	59	55	45
	Δt, °C	11	10	8	7	6	5	4
	φ	0,61	0,64	0,68	0,71	0,73	0,76	0,79
< 25	t, °C	100	93	88	83	77	70	56
	Δt, °C	30	28	26	24	22	19	15
	φ	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,37	0,41
<b>Форсированные режимы (Ф)</b>								
> 35	t, °C	82	79	75	70	-	-	-
	Δt, °C	7	6	5	4	-	-	-
	φ	0,74	0,77	0,80	0,83	-	-	-
35 - 25	t, °C	87	84	80	73	-	-	-
	Δt, °C	11	10	8	7	-	-	-
	φ	0,63	0,65	0,70	0,72	-	-	-
< 25	t, °C	108	106	100	91	-	-	-
	Δt, °C	32	30	28	26	-	-	-
	φ	0,28	0,30	0,32	0,33	-	-	-

**Приложение 5**

**Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов  
из древесины осины**

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер					
		Oс1	Oс2	Oс3	Oс4	Oс5	Oс6
		Толщина пиломатериалов, мм					
		до 22	св. 22 до 32	св. 32 до 40	св. 40 до 50	св. 50 до 60	св. 60 до 75
<b>Нормальные режимы (Н)</b>							
> 35	t, °C	78	75	71	66	60	53
	Δt, °C	11	9	8	7	6	5
	φ	0,61	0,66	0,69	0,71	0,73	0,76
35 - 25	t, °C	82	79	75	70	65	57
	Δt, °C	16	14	11	10	9	7
	φ	0,49	0,53	0,60	0,61	0,63	0,69
< 25	t, °C	100	96	92	87	82	72
	Δt, °C	36	33	31	28	23	18
	φ	0,20	0,22	0,24	0,28	0,34	0,40
<b>Форсированные режимы (Ф)</b>							
> 35	t, °C	85	82	79	73	-	-
	Δt, °C	10	8	7	6	-	-
	φ	0,66	0,71	0,73	0,76	-	-
35 - 25	t, °C	88	85	82	77	-	-
	Δt, °C	14	12	10	9	-	-
	φ	0,55	0,60	0,65	0,66	-	-
< 25	t, °C	110	107	102	96	-	-
	Δt, °C	36	33	30	26	-	-
	φ	0,24	0,26	0,29	0,34	-	-

**Приложение 6**

**Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов  
из древесины клёна, бука**

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер					
		K1	K2	K3	K4	K5	K6
		Толщина пиломатериалов, мм					
		до 22	св. 22 до 32	св. 32 до 40	св. 40 до 50	св. 50 до 60	св. 60 до 75
> 35	$t, ^\circ\text{C}$	74	70	64	62	56	52
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	6	5	4	4	3	2
	$\varphi$	0,76	0,79	0,82	0,82	0,84	0,90
35 - 25	$t, ^\circ\text{C}$	80	75	68	66	59	55
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	10	9	7	6	5	4
	$\varphi$	0,64	0,66	0,71	0,75	0,77	0,81
25 - 20	$t, ^\circ\text{C}$	100	93	74	72	63	58
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	29	26	11	10	6	5
	$\varphi$	0,31	0,33	0,60	0,62	0,74	0,77
20 - 15	$t, ^\circ\text{C}$	100	93	74	72	69	64
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	29	26	11	10	11	10
	$\varphi$	0,31	0,33	0,60	0,62	0,58	0,60
< 15	$t, ^\circ\text{C}$	100	93	88	83	78	70
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	29	26	24	23	21	19
	$\varphi$	0,31	0,33	0,34	0,34	0,36	0,37

**Приложение 7**

**Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов  
из древесины ясеня, ильма**

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер					
		Я1	Я2	Я3	Я4	Я5	Я6
		Толщина пиломатериалов, мм					
		до 22	св. 22 до 32	св. 32 до 40	св. 40 до 50	св. 50 до 60	св. 60 до 75
> 35	$t, ^\circ\text{C}$	60	57	53	50	45	41
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	4	4	3	3	2	2
	$\varphi$	0,81	0,81	0,84	0,84	0,89	0,89
35 - 25	$t, ^\circ\text{C}$	64	61	56	53	47	43
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	7	6	5	4	3	3
	$\varphi$	0,70	0,74	0,76	0,80	0,83	0,83
25 - 20	$t, ^\circ\text{C}$	83	77	60	56	51	47
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	23	22	9	8	5	4
	$\varphi$	0,34	0,34	0,61	0,64	0,75	0,79
20 - 15	$t, ^\circ\text{C}$	83	77	60	56	54	51
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	23	22	9	8	9	8
	$\varphi$	0,34	0,34	0,61	0,64	0,60	0,63
< 15	$t, ^\circ\text{C}$	83	77	70	66	65	60
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	23	22	20	19	18	17
	$\varphi$	0,34	0,34	0,35	0,35	0,37	0,37

Приложение 8

**Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины дуба, граба и ореха**

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер					
		Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6
		Толщина пиломатериалов, мм					
		до 22	св. 22 до 32	св. 32 до 40	св. 40 до 50	св. 50 до 60	св. 60 до 75
> 35	t, °C	57	53	50	47	43	38
	Δt, °C	4	3	3	2	2	2
	φ	0,81	0,84	0,84	0,89	0,89	0,89
35 - 25	t, °C	61	56	53	50	45	41
	Δt, °C	6	5	4	4	3	3
	φ	0,73	0,76	0,80	0,80	0,83	0,83
25 - 20	t, °C	77	70	57	55	49	45
	Δt, °C	22	20	8	7	4	4
	φ	0,34	0,35	0,65	0,68	0,79	0,79
20 - 15	t, °C	77	70	57	55	53	50
	Δt, °C	22	20	8	7	8	7
	φ	0,34	0,35	0,65	0,68	0,64	0,66
< 15	t, °C	77	70	66	62	61	56
	Δt, °C	22	20	18	17	17	16
	φ	0,34	0,35	0,38	0,38	0,38	0,38

Приложение 9

**Исходная продолжительность сушки пиломатериалов τ<sub>исх</sub> в камерах периодического действия при низкотемпературном процессе**

Толщина п/м S, мм	Ширина пиломатериалов, мм					
	40 - 50	60 - 70	80 - 100	110-130	140-180	более 180 и необр.
<b>Сосна, ель, пихта, кедр</b>						
До 16	23	25	26	27	27	27
19	29	31	32	33	33	33
22	34	37	39	39	39	39
25	45	50	53	54	55	55
32	59	63	68	72	73	73
40	71	79	84	86	88	88
50	-	93	99	100	104	105
60	-	103	114	122	125	130
70	-	-	147	161	178	194
75	-	-	156	177	197	218
100	-	-	340	354	379	432
<b>Лиственница</b>						
До 16	58	63	64	67	68	68
19	68	72	74	77	77	77
22	75	80	83	86	87	87
25	83	88	91	92	93	94
32	94	99	104	108	110	113
40	113	129	144	157	166	175
50	-	182	224	256	279	304
60	-	235	304	361	400	443
70	-	-	431	521	585	635
75	-	-	466	574	650	757
<b>Осина, липа, тополь</b>						
До 16	29	31	33	34	34	34
19	36	38	39	40	40	40
22	43	45	47	53	54	54
25	59	62	64	66	67	68



Окончание прил. 9

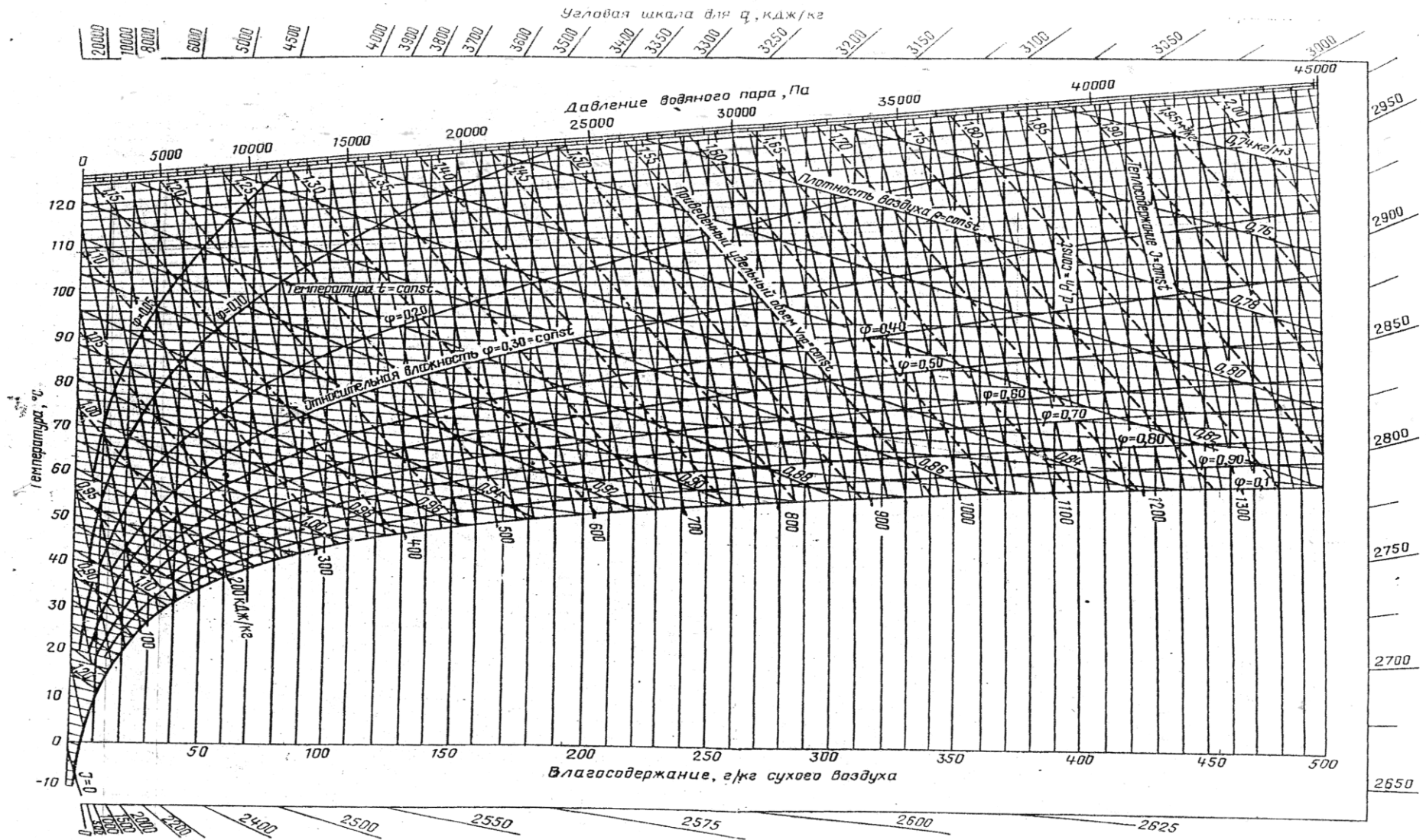
Толщина п/м, S, мм	Ширина пиломатериалов, мм					
	40 - 50	60 - 70	80 - 100	110-130	140-180	более 180 и необр.
32	73	80	84	88	89	91
40	81	87	93	96	99	102
50	-	98	109	116	119	123
60	-	112	128	140	152	164
75	-	-	253	282	311	344
<b>Берёза, ольха</b>						
До 16	36	37	37	38	39	39
19	44	45	47	47	48	48
22	50	51	53	54	55	55
25	67	73	78	81	83	84
32	81	85	88	91	92	94
40	93	96	100	101	105	107
50	-	115	130	141	149	158
60	-	155	187	213	231	249
75	-	-	377	420	463	514
<b>Бук, клён, ясень, ильм</b>						
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
<b>Дуб, орех, граб</b>						
До 16	84	85	86	87	87	88
19	88	91	94	96	96	97
22	97	101	104	105	105	107
25	117	125	132	136	138	140
32	146	173	193	206	214	221
40	183	234	269	293	307	321
50	-	365	431	488	520	551
60	-	562	679	777	841	905
75	-	-	1086	1209	1340	1483

**Приложение 10**

**Значения коэффициента объёмной усушки  $k_v$  и базисной плотности**

**$\rho_{баз}$  различных пород древесины**

Порода	Коэффициент объёмной усушки, $k_v$	Величина $\rho_{баз}$ , кг/м <sup>3</sup>
Пихта сибирская	0,39	300
Кедр	0,37	350
Ель, тополь	0,43	360
Сосна	0,44	400
Липа	0,56	400
Осина	0,41	400
Ольха	0,47	420
Береза	0,54	500
Лиственница	0,52	520
Бук	0,47	530
Клён	0,52	550
Ясень	0,45	550
Дуб	0,48	560
Граб	0,59	630



Приложение 12

**Зависимость давления насыщения водяного пара от температуры**

Температура, °С	Давление насыщения Р <sub>н</sub> , Па	Температура, °С	Давление насыщения Р <sub>н</sub> , Па	Температура, °С	Давление насыщения Р <sub>н</sub> , Па
1	2	3	4	5	6
0	610,8	53	14292,0	106	120799,0
1	656,6	54	15001,0	107	125042,0
2	705,4	55	15740,0	108	129408,0
3	757,5	56	16510,0	109	133898,0
4	812,9	57	17312,0	110	138515,0
5	871,8	58	18146,0	111	143260,0
6	934,6	59	19015,0	112	148140,0
7	1001,2	60	19919,0	113	153160,0
8	1072,1	61	20859,0	114	158320,0
9	1147,3	62	21837,0	115	163610,0
10	1227,1	63	22854,0	116	169050,0
11	1311,8	64	23910,0	117	174640,0
12	1401,5	65	25008,0	118	180380,0
13	1496,7	66	26148,0	119	186280,0
14	1597,4	67	27332,0	120	192330,0
15	1704,1	68	28561,0	121	198540,0
16	1817,0	69	29837,0	122	204910,0
17	1936,4	70	31161,0	123	211450,0
18	2962,6	71	32533,0	124	218150,0
19	2196,0	72	33957,0	125	225030,0
20	2336,8	73	35433,0	126	232090,0
21	2485,5	74	36963,0	127	239320,0
22	2642,4	75	38548,0	128	246740,0
23	2807,9	76	40190,0	129	254340,0
24	2982,4	77	41890,0	130	262130,0
25	3166,3	78	43650,0	131	270120,0
26	3360,0	79	45473,0	132	278300,0
27	3563,9	80	47359,0	133	186680,0
28	3778,5	81	49310,0	134	295270,0
29	4004,3	82	51328,0	135	304060,0
30	4241,7	83	53415,0	136	313060,0
31	4491,3	84	55572,0	137	322270,0
32	4753,6	85	57802,0	138	331710,0
33	5029,0	86	60107,0	139	341370,0
34	5318,2	87	62488,0	140	35125,0
35	5621,7	88	64947,0	141	361360,0
36	5940,1	89	67486,0	142	371700,0
37	6274,0	90	70108,0	143	382280,0
38	6624,0	91	72814,0	144	393110,0
39	6990,7	92	75607,0	145	404180,0
40	7374,9	93	78488,0	146	415500,0
41	7777,2	94	81460,0	147	427070,0
42	8198,3	95	84525,0	148	438900,0
43	8639,0	96	87658,0	149	450990,0
44	9099,8	97	90943,0	150	463340,0
45	9581,7	98	94301,0	151	475970,0
46	10085,4	99	97760,0	152	488870,0
47	10612,0	100	101325,0	153	502050,0
48	11161,0	101	101325,0	154	515520,0
49	11735,0	102	104996,0	155	529260,0
50	12335,0	103	108776,0	156	543310,0
51	12960,0	104	112668,0	157	557640,0
52	13612,0	105	116675,0	158	572280,0

Окончание прил. 12

Темпе- ратура, °С	Давление насы- щения $P_{н}$ , Па	Темпе- ратура, °С	Давление насы- щения $P_{н}$ , Па	Темпе- ратура, °С	Давление насы- щения $P_{н}$ , Па
1	2	3	4	5	6
159	587220,0	167	718300,0	175	871610,0
160	602480,0	168	736200,0	176	892460,0
161	618040,0	169	754450,0	177	913700,0
162	633930,0	170	773050,0	178	935340,0
163	650140,0	171	792020,0	179	957390,0
164	666680,0	172	811360,0	180	979840,0
165	683550,0	173	831060,0	181	1002700,0
166	700750,0	174	851140,0		

## Оглавление

Введение .....	3
1. Технологический расчет .....	4
1.1. Определение режима сушки пиломатериалов .....	4
1.2. Определение продолжительности сушки в камерах .....	4
периодического действия при низкотемпературном процессе .....	4
1.3. Пересчёт объёма фактического пиломатериала в объём условного материала .....	6
1.4. Расчёт производительности сушильных камер .....	8
2. Тепловой расчет .....	9
2.1. Выбор расчетного материала .....	9
2.2. Определение количества испаряемой из материала влаги .....	9
2.3. Расчётные параметры сушильного агента .....	10
2.3.1. Определение параметров агента сушки на входе в штабель .....	11
2.3.2. Определение параметров свежего приточного воздуха ...	12
2.3.3. Определение количества циркулирующего в камере .....	14
сушильного агента .....	14
2.4. Определение параметров воздухообмена и расчет .....	
приточно-вытяжных каналов .....	15
2.5. Определение расхода тепловой энергии на сушку пиломатериалов .....	17
2.5.1. Расход тепла на прогрев древесины .....	17
2.5.2. Расход тепла на испарение влаги .....	19
2.5.3. Расход тепла на компенсацию тепловых потерь .....	20
через ограждения камеры .....	20
2.6. Выбор типа и расчёт поверхности нагрева калориферов .....	23
2.7. Расчёт диаметров трубопроводов .....	29
2.8. Выбор конденсатоотводчиков .....	32
3. Аэродинамический расчет камеры .....	34
3.1. Определение потерь напора в кольце циркуляции .....	34
3.2. Подбор вентилятора .....	38
4. Планировка лесосушильных цехов .....	41
Ёмкость и необходимая площадь складов сырых и сухих пиломатериалов .....	42
Литература .....	43
Приложения .....	44



А.Г. Гороховский  
Е.Е. Шишкина  
В.В. Савина

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ КАМЕР ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

Екатеринбург  
2013