

к случаям сушки древесины с начальной влажностью ниже предела гигроскопичности.

Решение (158) сложно даже при простейших начальных и граничных условиях. Если опустить первый, не установившийся во времени период сушки и рассматривать следуемый за ним *регулярный режим*, протекающий при постоянном состоянии среды и неизменном коэффициенте влагопроводности по x и t , можно получить кривую влажности древесины по толщине пластины (широкой доски) в виде квадратичной параболы [2]:

$$w_x = w_u - (x/R)^2(w_u - w_n) = w_u(x/R)^2\Delta_w, \quad (159)$$

где w_x — локальная влажность древесины на расстоянии x от средней плоскости пластины в направлении перпендикулярном поверхности; R — половина толщины пластины; w_u — влажность в центре пластины (максимальная); w_n — влажность на поверхности пластины (минимальная); $w_u - w_n = \Delta_w$ — наибольший перепад влажности по толщине пластины.

Уравнение (159) соответствует кривой 4 (и 5) на рис. 61, а. При $x=0$ будет $w_x=w_u$ (точка *b*), при $x=R$ получим $w_x=w_n$ (точка *c*); при $x=0,5R$ (точка *e*) $w_x=0,75w_u+0,25w_n$ и т. д. Векторы *a* показывают направление потоков влаги, постепенно увеличивающихся от оси симметрии.

Так как площадь параболы составляет $\frac{2}{3}$ площади прямоугольника того же основания и высоты, средняя влажность w древесины в процессе сушки может быть определена на основе максимальной ее влажности в центральной части доски w_u и минимальной на ее поверхности w_n (кривая 4):

$$w = \frac{2}{3}(w_u - w_n) + w_n, \quad (160)$$

как это показано на рис. 61, а пунктирной горизонталью w_{cp} .

В производственных условиях при сушке обычно замеряют среднюю влажность w , а по состоянию воздуха и его равновесной влажности w_p учитывают влажность поверхности материала w_n . Если w_n заменить близкой ей w_p (при интенсивной циркуляции воздуха $\frac{D}{\beta} \rightarrow 0$, см. рис. 61) получим перепад влажности $\Delta_w = w_u - w_p$ по толщине материала

$$\Delta_w = \frac{3}{2}(w - w_p). \quad (161)$$

Максимальная влажность из (160) в средине толщины материала в точке *b* составит

$$w_u = \frac{3}{2}w - \frac{1}{2}w_p = \frac{1}{2}(3w - w_p). \quad (162)$$

Для оценки уровня процесса, а также при разработке его автоматизации перспективен исходный параметр Δ_c — *перепад сушки*, представляющий разность между средней влажностью w материала, замеряемой по контрольным его отрезкам или иным способом, и равновесной влажностью сушильного агента, определяемой по показанию психрометра. Из (161) имеем (см. рис. 63, а):

$$\Delta_c = \frac{2}{3} \Delta_w, \text{ т. е. } w - w_p = \frac{2}{3} (w_u - w_n), \quad (163)$$

т. е. перепад сушки Δ_c равен двум третям перепада влажности Δ_w или перепад влажности соответствует полуторной величине перепада сушки.

Из закономерности параболического распределения гигроскопической влаги по толщине материала следует, что точка средней влажности древесины будет находиться на расстоянии 0,21 толщины доски, считая от ее поверхности. Это учитывается при измерении влажности древесины электровлагомером путем внедрения в нее игл датчика на нужную глубину (см. рис. 49, б).

Продифференцировав (159) по x :

$$\frac{dw}{dx} = -2 \frac{x}{R^2} (w_u - w_n) = 2 \frac{w_u - w_n}{R} \cdot \frac{x}{R}, \quad (164)$$

получим уравнение касательной к кривой сушки, показывающей величину градиента влажности dw/dx в любой точке кривой влажности. Так как при $x=0 dw/dx=0$, т. е. в точке B (рис. 61, б) касательная есть горизонталь, а в точке C , когда $x=R$ (т. е. у поверхности материала), получим *градиент влажности* в виде $\operatorname{tg} \alpha$

$$\operatorname{tg} \alpha = dw/dx = 2(w_u - w_n)/R = 4\Delta_w/T, \quad (165)$$

где $T=2R$ — толщина материала.

Таким образом, при параболической кривой влажности величина градиента влажности на поверхности материала равна двойному перепаду влажности $2(w_u - w_n)$, отнесеному к половине толщины материала R (рис. 61, б). Средняя величина градиента влажности будет при $x=R/2$ и составит $(w_u - w_n)/R$.

Продолжив линию kC до пересечения ее с горизонталью w_p в точке e , получим отрезок eg , равный отношению коэффициента диффузии влаги D к коэффициенту влагоотдачи β (аналогично тепловым процессам, см. рис. 52, в). Отсюда легко определить β , если известно D .

Из (156) и (164) для поверхности материала, т. е. при $x/R=1$, получим

$$i = 2D(w_u - w_n)/R, \quad (166)$$

показывающее, что поток влаги i у поверхности высушиваемого материала равен коэффициенту влагопроводности, умноженному на градиент влажности (165). Если замерами установить значения i (по убыли массы контрольных отрезков материала), а также градиент влажности (как параметр опытно выявленной параболы, см. рис. 61, a), можно вычислить коэффициент диффузионной влагопроводности у поверхности материала, $\text{m}^2/\text{ч}$:

$$D = iR/2(w_u - w_n) = i \operatorname{tg} \alpha. \quad (167)$$

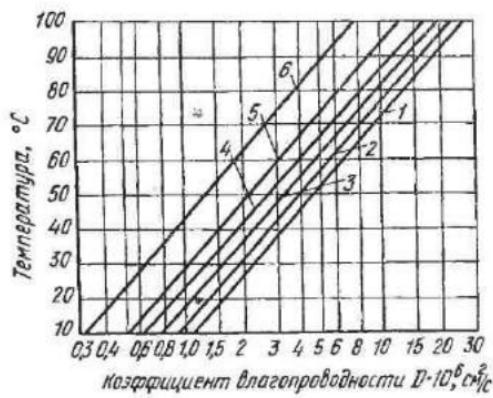


Рис. 62. Средние коэффициенты диффузионной влагопроводности древесины:

1 — осина; 2 — ель; 3 — береза; 4 — бук;
5 — лиственница; 6 — дуба

Диффузионная влагопроводность древесины в большой мере зависит от ее температуры. На рис. 62 приведены усредненные коэффициенты диффузионной (т. е. при влажности ниже 30—20%) влагопроводности древесины основных пород по опытным данным П. С. Серговского. Для чисто заболонной или чисто ядровой (спелодревесной) древесины сосны и ели введены коэффициенты соответственно 1,25 и 0,75 [27].

Особенности передвижения свободной влаги

Коэффициент D_k ($\text{м}^2/\text{ч}$) капиллярной влагопроводности можно определить так же, как и коэффициент диффузионной влагопроводности (155) и (156), но в начальный период сушки — в точке u_i , расположенной вблизи линии $w_{n,g}$, на кривой I (см. 61, a) и являющейся частью id параболы:

$$D_k = iR/[2(w_u - w_n)]. \quad (168)$$

Коэффициент капиллярной влагопроводности в обычных условиях сушки значительно меньше, чем диффузионной. Мнение о том, что свободная влага удаляется из древесины быстрее, чем связанная, и что главная трудность в проведении процесса — это удаление из древесины гигроскопической влаги, необоснованно.

Установлено, что в верхней части диаграммы (см. рис. 61, a), над линией предела гигроскопичности, кривые влажности имеют закономерный характер, как и в нижней, являясь продолжением ветви нижних кривых, но с перегибом и даже изломом

(точки P , y) на линии предела гигроскопичности. Если к обеим кривым провести касательные P_n и P_d в точке P , выявится наличие большего градиента влажности для верхнего участка кривой P_n , чем для нижнего P , хотя поток влаги для них в точке P одинаков. Это доказывает, что свободная влага вблизи влажности предела гигроскопичности передвигается со значительно большим сопротивлением, чем гигроскопическая ниже этого предела.

То же будет получено и в стационарном режиме (см. рис. 61, б), когда одна пластина доски будет беспрерывно смачиваться водой, а вторая испарять влагу. Наклон отрезка Rx к горизонту покажет большую величину градиента влажности (при передвижении свободной влаги), чем наклон отрезка xc (для того же потока гигроскопической влаги).

Лишь некоторое количество свободной, осмотически связанной влаги при высокой влажности древесины, когда влага содержится в полостях или крупных капиллярах ($r > 10^{-2}$ мм), перемещается в виде молярного потока жидкости (зона $w_n - m - w_s$ на рис. 61, а) с коэффициентом влагопроводности, приближающимся к бесконечности (линия влажности — горизонталь kd). Таким образом, потоки свободной влаги можно расчленить на два вида — молярный (над точкой m) и капиллярный. К такому же выводу приводит анализ кривой на рис. 59, а.

Для ускорения общего процесса сушки желательно увеличить зону действия первого потока за счет сокращения зоны второго.

Специфические явления и закономерности передвижения влаги в древесине разных пород при различных условиях остаются недостаточно раскрытыми. В первую очередь это относится к свободной влаге, составляющей основное количество (обычно от 25 до 75%-ной влажности древесины, или около $\frac{3}{4}$) подлежащей удалению влаги из древесины во время сушки; на долю гигроскопической остается только около 15% от 25 до 10%-ной влажности, т. е. около $\frac{1}{4}$ от общего количества удаляемой влаги.

На поток влаги в области капиллярной влагопроводности, т. е. выше $w_{n,g}$, неправильно распространять относящиеся к области диффузионной влагопроводности постоянство коэффициента влагопроводности, квадратическую зависимость продолжительности сушки с уменьшением толщины сортиента, влияние породы, соотношения величин коэффициентов влагопроводности в разных структурных направлениях древесины и др. Все это приобретает практическое значение для расчетов продолжительности процесса, разработки режимов сушки и для техники их проведения (стимулирования потока свободной влаги).

33. ПРОТЕКАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ВО ВРЕМЕНИ (КИНЕТИКА СУШКИ)

Графическое изображение процесса сушки

Продолжительность сушки колеблется от нескольких недель (для толстых досок, брусьев, заготовок в обозном и колодочном производстве и др.) до нескольких секунд и даже долей секунды (для частиц в производстве древесноволокнистых плит), т. е. изменяется в миллионы раз. Несмотря на это, основные закономерности процесса сушки древесины остаются для них общими. Выделяются только специфические особенности высушивания различных древесных материалов, в особенности толстых, трудно сохнущих.

До начала сушки материал прогревается, сначала с поверхности, а с течением времени t_1 по всему сечению. Процесс испарения влаги в окружающую среду начинается лишь в условиях, когда давление пара на поверхности материала p_d превышает его давление p_n в окружающем воздухе (т. е. когда $p_d > p_n$, см. рис. 58).

Рассмотрим процесс медленной сушки тонкого материала с высокой начальной влажностью при неизменном состоянии нагретого воздуха с высокой насыщенностью ф пара. В этом случае после прогрева с поверхности материала испаряется некоторое количество свободной влаги так же, как испаряется вода со свободной поверхности. Скорость испарения остается во времени неизменной, образуя *период постоянной скорости сушки* (рис. 63).

При достижении поверхностью материала влажности, соответствующей пределу гигроскопичности, начнет испаряться связанная влага. Скорость ее испарения постепенно замедляется из-за уменьшения градиента влажности (см. рис. 61, а) и повышения энергии связи. Основное время сушки, в течение которого с поверхности материала испаряется связанная влага, называется *периодом убывающей скорости сушки* τ_3 (см. рис. 63). При интенсивной сушке (тем более толстых сортиментов, особенно с невысокой начальной влажностью) периода постоянной скорости сушки нет, и процесс складывается из периодов $\tau_1 + \tau_3$.

Линия уменьшения влажности древесины во времени называется *кривой сушки*, а производная от нее линия — *кривой скорости сушки*.

На рис. 63, а нанесены кривые сушки: отрезок AB показывает прогрев материала при $w = \text{const}$, BC — период постоянной скорости сушки (если он есть), CD — период убывающей скорости сушки и DE время τ_4 кондиционирования высушенного материала. На основе логарифмической кривой сушки w путем ее графического дифференцирования может быть построена для участка CD аналогичная по форме кривая скорости сушки

dw/dx . Кривые $w_{\text{ц}}$ и w_{n} показывают влажность в центре и на поверхности материала. Отмечена разность ординат $w - w_p = \Delta_c$ и $w_{\text{ц}} - w_{\text{n}} = \Delta_w$ (163). В периоде τ_4 (рис. 63, б) t и t_m повышаются.

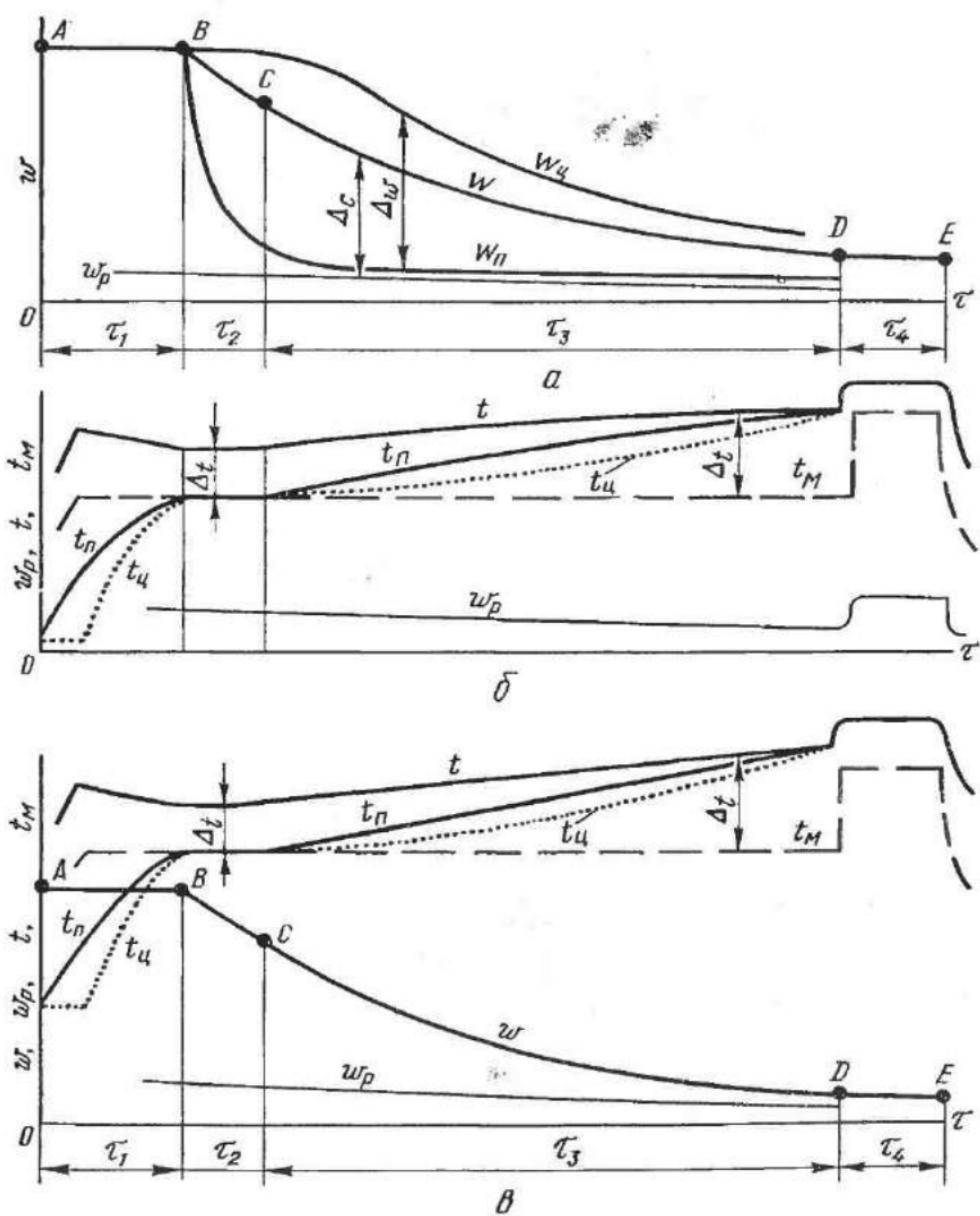


Рис. 63. Графическое изображение процессов сушки:

a — кривые сушки и равновесная влажность воздуха w_p ; **б** — температурные кривые; **в** — совмещение кривых; t — температура по сухому термометру; t_m (пунктиром) — температура по мокрому термометру психрометра; t_n — температура поверхности материала; t_d (точками) — температура в центральной зоне по толщине материала, Δ_t — психрометрическая разность $t - t_m$.

В производственных условиях по мере протекания сушильного процесса обычно изображают кривые w , t и t_m , а в лабораторных — для более углубленного изучения процесса сушки — также и дополнительные кривые.

Уравнение кривой скорости сушки

При равномерном начальном распределении влажности в древесине, постоянных в процессе сушки коэффициентах влагопроводности D , влагоотдачи β и параметрах среды на основании дифференциального уравнения тепло- и влагопереноса (158) для бесконечной пластины получено уравнение скорости сушки [2]:

$$\frac{dw}{d\tau} = -[D(w - w_p)] / \left[R^2 \left(\frac{4}{\pi^2} + \frac{1}{HR} \right) \right]. \quad (169)$$

где w — средняя текущая влажность материала; H — отношение коэффициента влагоотдачи к коэффициенту влагопроводности; $H = \beta/D$, где β — коэффициент влагоотдачи, определяющий скорость сушки, отнесенную здесь к 1% разности влажностей $w - w_p$ материала. Величина $HR = (\beta/D)R$ — влагообменный критерий Био.

Из числителя этого уравнения следует, что скорость сушки пропорциональна разности $w - w_p$ и коэффициенту влагопроводности D . Если в знаменателе член $1/HR$ мал по сравнению с $4/\pi^2$, то, пренебрегая им, получим уравнение кривой скорости сушки:

$$\frac{dw}{d\tau} = -\frac{D\pi^2}{4R^2} (w - w_p). \quad (170)$$

В этих условиях скорость сушки определяется в основном влагопроводностью материала D . Продолжительность сушки при $D = \text{const}$ обратно пропорциональна квадрату толщины материала. Это уравнение применимо к интенсивной сушке толстых сортиментов при низкой влажности древесины, когда влияние β на скорость всего процесса приближается к нулю.

Если соотношение $1/HR$ во много раз больше $4/\pi^2$, т. е. критерий Био мал (незначительны R или β , или большое D), отбросив член $4/\pi^2$ и подставив вместо H значение β/D , получим

$$\frac{dw}{d\tau} = -\frac{\beta}{R} (w - w_p). \quad (171)$$

В этом случае процесс определяется в основном коэффициентом влагоотдачи β , а влагопроводность D не ограничивает скорость сушки. Уравнение (171) характеризует медленную сушку тонкого материала, когда градиенты влажности малы и кривые влажности по толщине материала (см. рис. 61, а) близки к горизонтальным.

На продолжительность сушки влияет ряд факторов. Практически можно считать, что при штабельном (ширина 1,8 м) высушивании обычных пиломатериалов в камерах со скоростной побудительной циркуляцией воздуха продолжительность сушки в среднем пропорциональна полупорной степени [32] толщины материала, т. е. $\tau = aR^{3/2}$, (172).

Для очень толстого материала твердых пород зависимость между продолжительностью сушки и толщиной материала близка к предельно максимальной квадратичной (170), а для тонких пиломатериалов к предельной линейной (171). Показатель степени понижается также с уменьшением плотности материала и скорости движения по нему воздуха, с уширением штабеля, повышением влажности высушиваемой древесины [33], его температуры при постоянной Δ_t и других факторов.

Уравнение кривой сушки

Независимо от количественного соотношения $\tau(R)$ из (170) и (171) следует, что

$$dw/d\tau = (w - w_p)/b. \quad (173)$$

$$\text{Отсюда } d\tau = b \cdot dw/(w - w_p), \quad (174)$$

где b — обобщенный коэффициент.

Интегрируя в пределах от начальной w_n до конечной w_k влажности

$$\int d\tau = b \int_{w_k}^{w_n} \frac{dw}{w - w_p}, \quad (175)$$

получим для продолжительности τ процесса

$$\tau = b \ln \frac{w_n - w_p}{w_k - w_p} = b \ln \frac{1}{M}. \quad (176)$$

Здесь M — безразмерная удаляемая влажность, аналогичная Θ для безразмерной температуры (133).

В строгом рассмотрении это соотношение справедливо только при соблюдении условий о постоянстве D и β на протяжении процесса сушки, наличии регулярного режима и $w_n < w_{n,r}$. Отсюда получим уравнение кривой сушки [2]:

$$\tau = A \lg \frac{w_n - w_p}{w - w_p}, \quad (177)$$

где w — текущая влажность древесины, %.

Зависимость (177) имеет большое значение для расчета продолжительности сушки материала различной влажности, а также для анализа и контроля самого процесса. При неодинако-

вой w_n кривые сушки аффинны (подобны); они сближаются с увеличением τ .

В полулогарифмических координатах или при откладывании на оси ординат логарифмов значений $w - w_p$ уравнение (177) изобразится графически в виде прямой. Тангенс угла ее наклона к горизонтали определит среднюю интенсивность всего процесса сушки, называемую коэффициентом сушки K . Из (176) получим

$$K = 1/b = 2,3 [\lg (w_n - w_p) - \lg (w_k - w_p)]/\tau. \quad (178)$$

По величине K удобно сравнивать средние интенсивности различных процессов сушки при разных τ , w_p , w_n и w_k материала. С учетом (172) получим (при $T=2R$)

$$\tau = cT^n \lg \frac{w_n - w_p}{w - w_p}. \quad (179)$$

Если w_p близка к нулю или отсчет на оси координат начинается от w_p , а величина n близка к 1,5, напишем

$$\tau = cT^{\frac{3}{2}} \lg \frac{w_n}{w}. \quad (180)$$

Приняв для сосновых досок единичной толщины (50 мм) с начальной влажностью $w_n=60\%$ и текущей w или конечной $w_k=12\%$, продолжительность сушки $\tau=120$ ч, определим значение c : $120=c \cdot 1 \cdot \lg 5=0,699 c$; т. е. $c=172$.

Последнее соотношение для этих условий имеет следующий вид (считая $w=w_k$):

$$\tau = 172 (T/50)^{\frac{3}{2}} \lg \frac{w_n}{w_k} = 0,485 T^{\frac{3}{2}} \lg \frac{w_n}{w_k}. \quad (181)$$

Например, для аналогичных по характеристике, назначению и технике сушки (но толщиной 30 мм) сосновых досок при $w_n=50\%$ и $w_k=8\%$ $\tau=0,485 \cdot 30^{\frac{3}{2}} \lg 6,25=72$ ч.

Указанное соотношение и метод расчета применимы для выявления средней продолжительности сушки наиболее широко используемых в промышленности сосновых пиломатериалов.

Взаимозависимость динамики и кинетики сушки

В рассматривавшемся ранее [см. (108)] соотношении $\sigma=\epsilon E$ предельные параметры $\sigma=\sigma_{pr}$ прочности в поперечном к длине волокон направлении и модуля упругости E изменяются в процессе сушки древесины по аналогичной закономерности. Поэтому вместо напряжений σ можно иметь в виду отношение σ/E , т. е. учитывать упругую деформацию ϵ и сравнивать ее с остаточной и влажностной деформациями.

Процесс сушки пиломатериалов многообразен по участвующим в нем параметрам и сложен по его протеканию, поэтому желателен упрощенный, но достаточно надежный производственный метод анализа и оценки этого процесса для получения нужных технологических показателей сушки пиломатериалов. Для анализа можно использовать изложенные функциональные зависимости по динамике сушки (159) — (166) в сочетании их

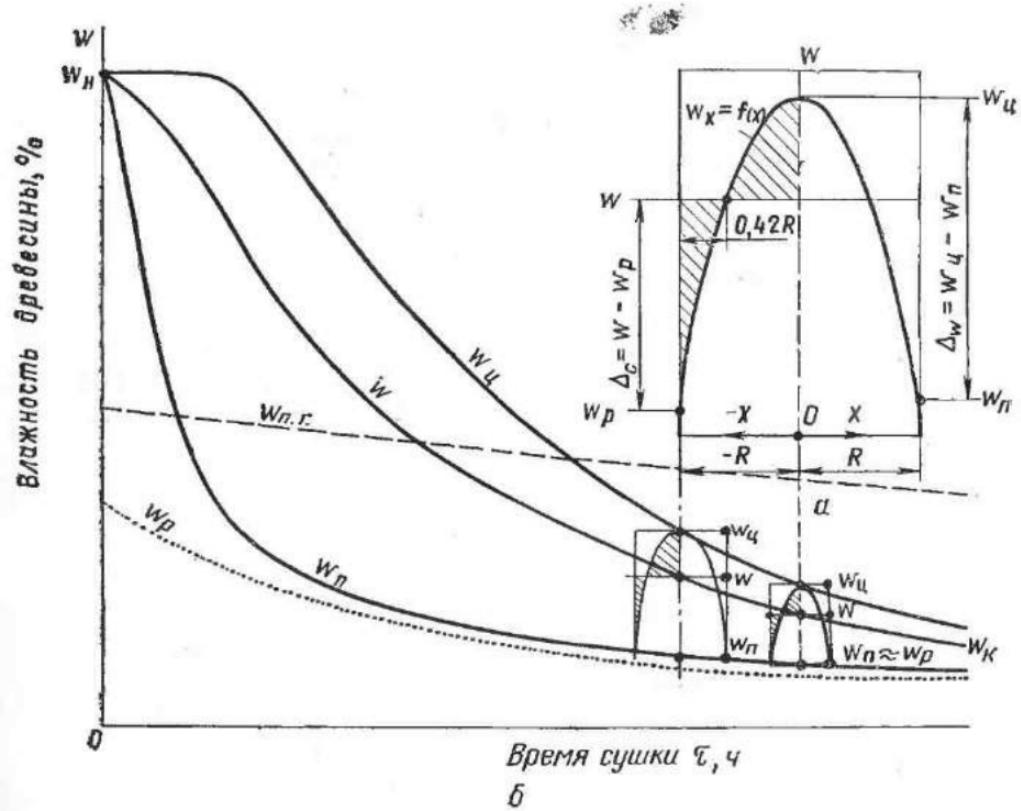


Рис. 64. Совмещение графическое изображение параметров динамики и кинетики сушки пиломатериалов:

а — кривая влажности со значениями параметров динамики сушки; *б* — кривые сушки, нанесенные совмешенно с кривыми влажности

с закономерностями кинетики сушки (172) — (180). Такой совмещенный анализ явлений динамики и кинетики сушки имеет непосредственное отношение к получению заданного качества сушки пиломатериалов (по показателю Δ_w) и к построению в связи с этим режима сушки.

На рис. 64, *а* (справа) показана кривая влажности по толщине материала во второй стадии сушки при регулярном режиме процесса. Соотношение между средней влажностью w

и перепадом влажности Δ_w характеризуется уравнением (160). На рис. 64, б построены кривая сушки доски $w(\tau)$, а также кривые сушки у поверхности w_n и в центре ее сечения w_d ; точками показана равновесная w_p влажность воздуха, а пунктиром — влажность предела гигроскопичности $w_{n,g}$ древесины.

Подставив значение w из (160) в (177), получим

$$\tau = A \lg \frac{w_n - w_p}{(2/3)\Delta_w + w_n - w_p} \approx A \lg \frac{w_n - w_p}{(2/3)\Delta_w}. \quad (182)$$

Решив относительно перепада влажности Δ_w , получим

$$\Delta_w = \frac{3}{2} 10^{-\frac{\tau}{A}} (w_n - w_p). \quad (183)$$

Величина τ/A показывает относительную длительность процесса сушки: при $\tau/A=0$ — процесс еще не начался, при $\tau/A=0,5$ он выполнен наполовину, а при $\tau/A=1$, если $w_n - w_p = 10(w_k - w_p)$, т. е. $\tau = A \lg 10 = A$, закончен.

Пример. При $w_n = 73\%$, $w_p \approx w_n = 3\%$ по окончании сушки, т. е. когда $\tau/A = 1$ и $w_k = 10\%$ с учетом (183), определим $\Delta_w = 3(73-3)/(2 \cdot 10) = 10,5\%$, а $w_d = 3 + 10,5 = 13,5\%$. Величина Δ_w уменьшается при продолжении сушки, т. е. снижении w_k , как это следует из (161), а также при влаготеплообработке.

Рассмотренные зависимости распространяются и на туннельный процесс сушки [34], в котором не проводят промежуточных влаготеплообработок и конечного кондиционирования материала.

Величина Δ_w — основной показатель качества сушки.

34. ВНУТРЕННИЕ ДЕФОРМАЦИИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ПИЛОМАТЕРИАЛАХ В ПОПЕРЕЧНОМ НАПРАВЛЕНИИ ПРИ СУШКЕ

Состав деформаций

Раскрытие сложных закономерностей, возникающих при сушке пиломатериалов в виде деформаций, и управление ими составляет основу изучения и ведения сушильного процесса. При изменении в древесине количества связанный влаги наблюдаются деформации трех видов: 1) усушка и обусловленное ею коробление сортимента, при этом влага может быть распределена равномерно по его сечению; эти деформации (см. рис. 39) происходят без напряжений в материале, если нет внешних противодействий усушке; 2) внутренние деформации в сечении материала, обусловленные перепадом гигроскопической влажности (см. рис. 61, а), т. е. зональной разностью усушек в сечении сортимента; 3) деформации остаточного растяжения (уменьшающего величину усушки) или, наоборот, упрес-

совки древесины (в центральной зоне сортимента, с образованием раковин) в поперечном к волокнам направлении.

Рассмотрим второй вид деформаций, возникающих в процессе сушки под действием развивающихся внутренних сил. В начале сушки, при понижении влажности у поверхности материала (см. рис. 61, а) ниже предела гигроскопичности, древесина начинает усыхать. Однако в центральной зоне материала влажность еще высокая, размеры остаются прежними и препятствуют усушке древесины в поверхностной зоне, поэтому поверхностная зона оказывается растянутой. Аналогичные внутренние упругие деформации (температурные напряжения), но во много раз меньшие по величине (поэтому не учитываются далее), наблюдаются при быстром охлаждении материала (см. рис. 52, в).

Поскольку система находится в состоянии статического равновесия, древесина в центральной зоне будет соответствен-но ската. Такова схема напряжений в первой стадии сушки. Возникающие при этом внутренние деформации разделяются на влажностные, упругие и остаточные.

Влажностные деформации B образуются вследствие зонального изменения количества связанный влаги при сушке или увлажнении древесины (см. симметричную кривую влажности по толщине материала на рис. 61, а, кривая 4). Величина этой деформации равна перепаду влажности Δ_w на $1/2$ толщины материала, умноженному на средний в данном направлении коэффициент усушки K ,

$$B = K(w_u - w_n)/100. \quad (184)$$

Упругие деформации Y пропорциональны напряжениям σ и обратно пропорциональны модулю упругости E в поперечном направлении. Координация режимов сушки по упругим деформациям Y , как определяющему параметру протекающих реологических процессов и показателю деформативности древесины, предпочтительнее, чем по напряжениям σ вследствие: наглядности и сопоставимости измерений всех внутренних деформаций, возможности комплексного их расчета, выпадения трудоемких измерений параметра E (поскольку $Y=\sigma/E$), охвата параметром Y влияния переменных при сушке p , t , w древесины, а также выявления скорости нарастания остаточных деформаций, являющихся функцией упругих. Измеряют Y по изгибу слоя в момент откалывания (см. рис. 67, б, 1).

Остаточные O (в основном пластические) деформации свойственны древесине, как высокомолекулярному полимеру. Они начинают накапливаться во времени вскоре после возникновения упругих деформаций со скоростью нарастания, пропорциональной величине Y . При отрицательных (сжимающих) упругих деформациях остаточные деформации постепенно

уменьшаются и могут получить нулевое и даже отрицательное значение. Таким образом, при положительных упругих деформациях происходит остаточное растяжение поперек волокон, а при отрицательных — упрессовка древесины.

Здесь рассмотрены *разностные* по толщине материала деформации, направленные касательно к его ширине, на переменном расстоянии от поверхности доски.

Закономерности развития деформаций

Развитие влажностных B , упругих Y и остаточных O внутренних деформаций на протяжении сушки пиломатериалов показано графически на рис. 65. На рис. 65, *a* изображены температурные кривые воздуха. Сплошными линиями на рис. 65, *b* нарисованы кривые влажности древесины поверхностной w_n и центральной w_c зоны по толщине материала. Кривая средней его влажности w показана пунктиром. Разность ординат $w_n - w_c$ обозначает перепад гигроскопической влажности в центральной и поверхностной зонах материала. С учетом (184) получим влажностную деформацию B , беспрерывно изменяющуюся во время t сушки.

У сушки древесины, следовательно, отсчет B начинается от горизонтали 1—3, т. е. ниже предела гигроскопичности $w_{n.r}$. Вправо от точки 1 на кривой w_n величина B нарастает, а затем правее точки 3 падает.

С момента начала удаления связанной влаги (точка 1) из поверхностной зоны материала в ней возникают касательные упругие деформации Y и, следовательно, в первой стадии сушки развиваются напряжения растяжения, способствующие появлению (точка $t=2$) и затем накоплению (разность ординат O от нижней кривой w_n до пунктирной линии) остаточных деформаций (особенно в более напряженной поверхностной зоне). Из-за их развития снижается скорость нарастания упругих деформаций Y , достигающих максимального значения в точке 3, что создает наибольшую опасность наружного растрескивания материала. Затем Y за счет O уменьшаются и при завершении первой стадии сушки в точке 4 приобретают нулевое значение. В этот момент времени $O=B$, т. е. остаточные деформации увеличились до значения влажностных и дальнейшее нарастание O прекратится.

Таким образом *первая стадия* сушки характеризуется:

- а) развитием растягивающих упругих деформаций в поверхностной зоне материала с опасностью ее растрескивания и соответственно сжимающих в центральной зоне материала;
- б) беспрерывным нарастанием остаточных деформаций O ;
- в) равенством $B=Y+O$ или $O=B-Y$.

Во *второй стадии* сушки накопившиеся остаточные деформации O оказываются больше спадающих влажностных B , т. е.

$O > B$. Поэтому упругие деформации Y меняют знак: в наружной зоне сортимента они будут безопасными сжимающими, а во внутренней растягивающими, опасными в отношении разрыва материала; при этом в общем виде $O = B + Y$. Из-за наличия растягивающих упругих деформаций Y в центральной зоне, остаточные O после точки 4 постепенно уменьшаются.

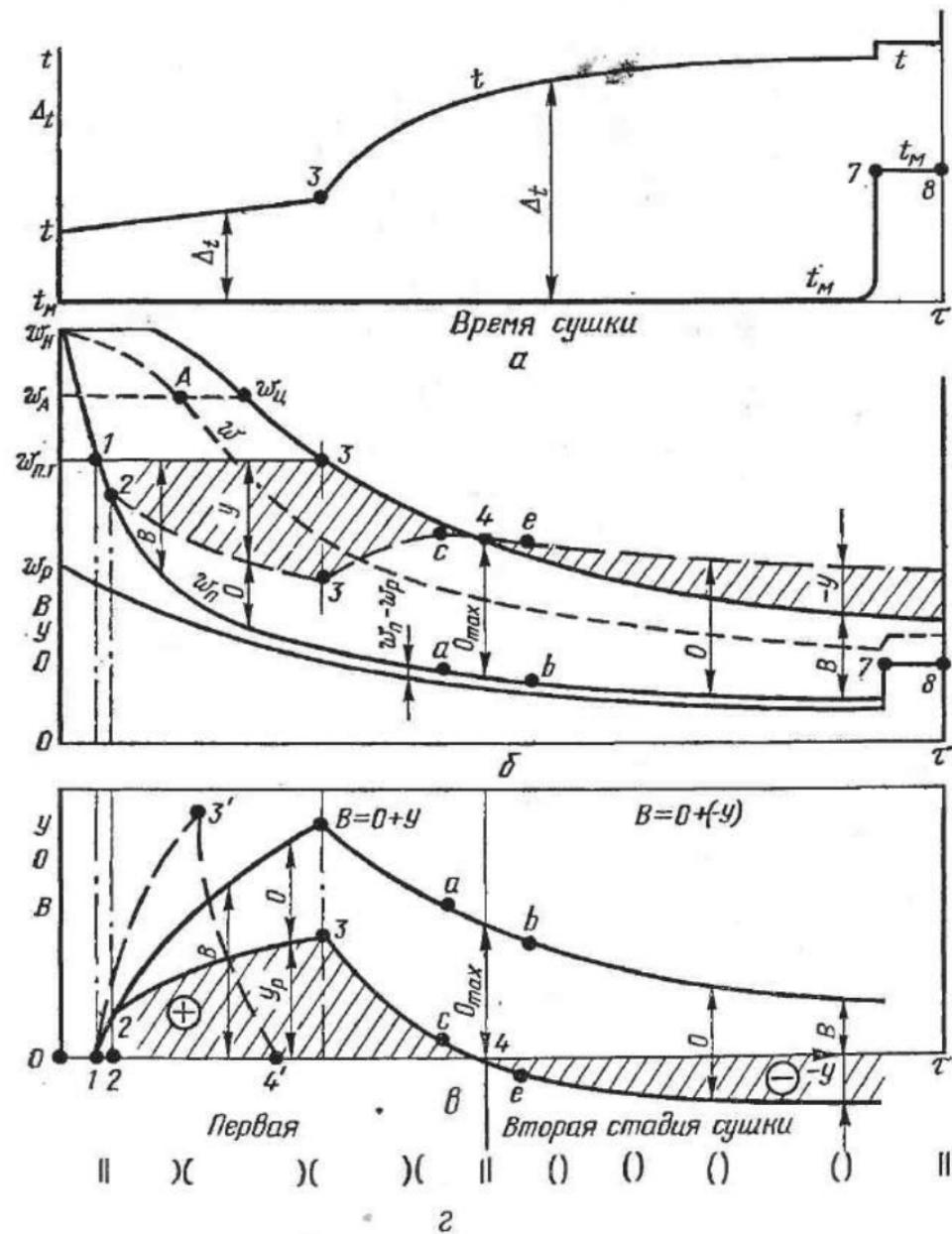


Рис. 65. Эпюры реологии сушки:

а — ход температур; **б** — влажностно-упругие деформации; **в** — упруго-остаточные деформации;

Вторая стадия сушки характеризуется: а) растягивающими упругими деформациями в центральной зоне материала с опасностью возникновения внутренних трещин (раковин); б) непрерывным уменьшением во времени остаточных O деформаций; в) равенством $O=B+Y$ или $Y=O-B$.

Для получения сухого материала с минимальными B и Y в конце сушильного процесса материал кондиционируют, увлажняя поверхностную зону (участок 7—8) и дополнительно его нагревая. При этом возникает противоположный перепад влажности и значительные упругие деформации Y растяжения во внутренней зоне [13, 14]. При последующем охлаждении материала поверхностная влага быстро теряется, поэтому приближается к нулю и величина Y ; исчезает зональная разность O .

Из кривых рис. 65, б следует, что чем меньше на протяжении всего процесса будет B (тоньше материал, больше продолжительность процесса и коэффициент влагопроводности), тем ниже будут значения Y и O . Если B приближается к нулю (например, сушка при диатермическом нагреве), к той же величине будут стремиться Y и O . Наоборот, Y и O при больших значениях B будут возрастать, поэтому толстые пиломатериалы меньше усыхают, пластически растягиваясь во время сушки в поперечном сечении.

На рис. 65, б в виде разности ординат в гигроскопической области w_d-w_n показана влажностная деформация B , которая до момента времени t_4 (в точке 4) равна упругой Y вместе с остаточной O . В точке 4 упругие деформации Y равны нулю и далее меняют знак (см. рис. 65, г, аналогичный рис. 67, а, Y), а остаточные ce и ab спрямленных участков кривых (пунктирной и w_n) параллельны между собой.

Эта особенность всех кривых вблизи точки 4 способствует установлению эквивалента между B и O (поскольку Y равна нулю), а также выявлению участка ce пунктирной кривой и помогает ее построению. Безде, кроме начального участка, обычно $O>Y$, а во второй стадии Y составляет небольшую часть O .

На рис. 65, в изображены значения B и Y в виде ординат от горизонтальной оси $O-t$. В регулярном процессе сушки нарастание ординат B и Y до точки 3 (максимума B и Y) характеризуется выпуклой кривой, аналогичной температурной кривой t на рис. 65, а, а после точки 3 — вогнутой, аналогичной кривой сушки на рис. 65, б. И на этой диаграмме спрямленные отрезки ab и ce кривых B и Y вблизи точки 4 параллельны. При проведении более жесткого режима сушки точка 3 на рис. 65, в максимальных деформаций возникает раньше и выше (см. пунктирную кривую 1—3'), смещается и точка 4 (кривая 3'—4' вместо 3—4). На рис. 65, в заштрихованы зоны растягивающих напряжений.

Эпюры Y -деформаций с учетом поперечного коробления пиломатериалов в регулярном процессе показаны графически на

рис. 66. На рис. 66, а (слева) изображено поперечное сечение обычно покоробившегося образца с кривой упругих деформаций Y , которой соответствуют параболические эпюры напряжений $\sigma = Y E$ по толщине материала в I и II стадиях сушки.

В производственных условиях материал высушивают в захватом прокладками плоском состоянии для предотвращения

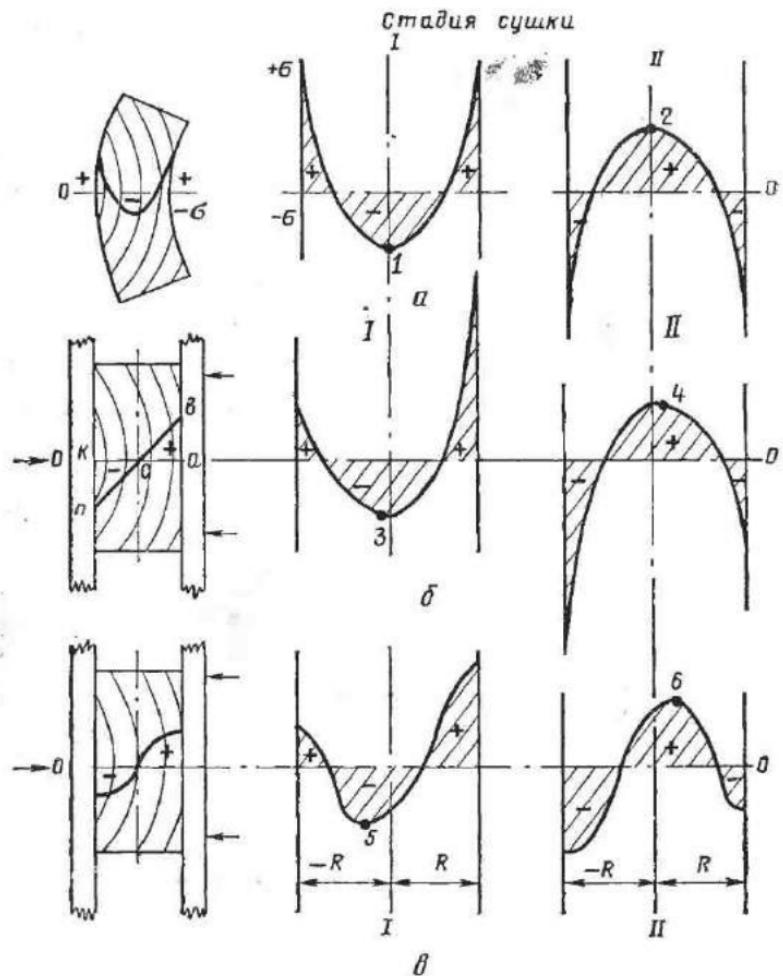


Рис. 66. Возникновение асимметрии напряжений в сохнущем материале из-за противодействия прокладками его короблению

коробления, «изгиба» его при сушке, таким образом, в направлениях противоположных естественному короблению. В результате изгиба из естественно покоробленного в искусственное плоское состояние в сечении материала возникают упругие деформации растяжения (+) и сжатия (-) (рис. 66, б), изображаемые в виде двух обычных треугольников abc и nck . Вслед-

ствие этого эпюры полных напряжений (внутренних плюс от нагрузки прокладками) потеряют симметрию, как это показано на эпюрах I и II [20].

Следовательно, для любых пиломатериалов, кроме выпиленных строго радиально, эпюры полных напряжений асимметричны, имеют сдвиг наибольших растягивающих напряжений к наружной пласти доски. При этом точки экстремума 1 и 2 (рис. 66, а) смещаются в положение 3 и 4 (см. рис. 66, б), что повышает опасность растрескивания плоско зажатого материала в стадии I сушки.

Поскольку древесина упруго-вязкий материал, эпюры деформации видоизменяются, как это показано на рис. 66, в. Существенно, что ордината максимальных напряжений в центральной зоне материала (точки 5 и 6) также сместится, т.е. возможные внутренние трещины (раковины) сдвинутся к наружной пласти доски. В толстом материале распределение касательных деформаций по толщине еще более сложно. Их знак может неоднократно (гармонически) изменяться по координате R .

Рассмотрим методы производственного обнаружения и на глядного представления внутренних деформаций в процессе сушки пиломатериалов.

На рис. 67, а в поперечном сечении пиломатериала показаны три стадии развития деформаций во время сушки (H — начальная, I — первая, II — вторая стадия) и два зафиксированных состояния материала (пунктиром) — P — переходное состояние от первой ко второй стадии и K — конечное состояние, когда в результате кондиционирования материала влажностные деформации устранены, а остаточные выравнены, поэтому исчезнут и упругие.

В верхнем ряду показана постепенная убыль влаги по сечению материала в виде *кривых влажности* (слева знак B), во втором ряду — немедленная деформация сечения материала, расколотого на два слоя, что демонстрирует проявление упругой деформации (знак Y). В третьем ряду показана деформация этих слоев после длительной выдержки или окончательной просушки для выравнивания влажности, чтобы проявились только остаточные деформации (знак O).

Упругие деформации в начале сушки (см. ряд Y) проявляются в форме изгиба отделенных слоев со стрелой f , показывающего растяжение поверхности зоны материала (если слои усилием выпрямить до исходного прямолинейного положения, возможно их наружное растрескивание). Во второй стадии сушки изгиб слоев в этом ряду показывает деформацию растяжения внутренней зоны материала ($2f$).

Остаточные деформации накапливаются на протяжении первой стадии сушки, достигают максимума в переходном P состоянии материала и спадают во II стадии, что фиксируется

величиной изгиба слоев O (в третьем ряду на рис. 67, а) или относительной их длиной (см. рис. 35, д).

Завершение кондиционирования материала характерно отсутствием как упругих Y , так и разности остаточных O деформаций по толщине материала, т. е. слои K не показывают изги-

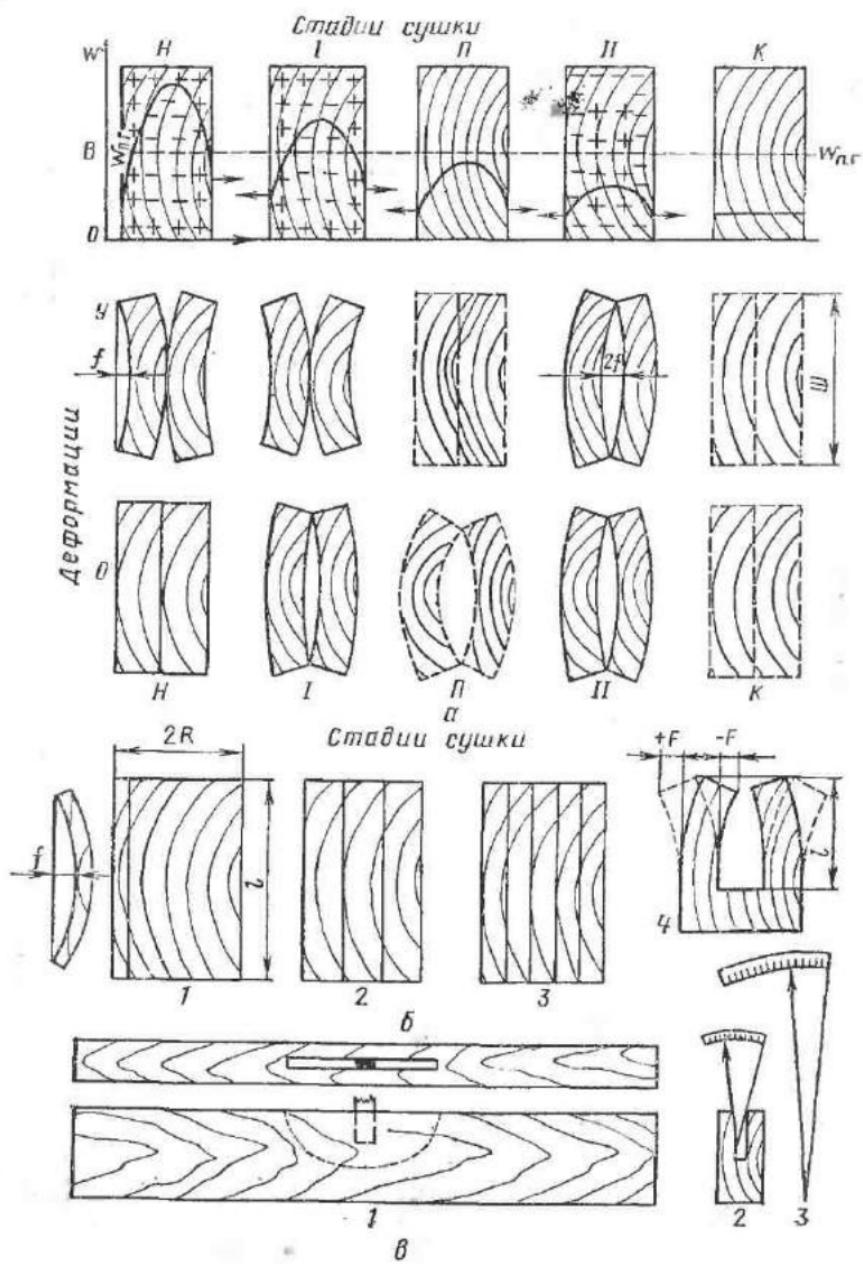


Рис. 67. Методы выявления внутренних деформаций в высушиваемых пиломатериалах

ба ни в момент раскалывания, ни после выдержки древесины для выравнивания влажности.

На рис. 67, б показаны схемы раскалывания контрольных силовых образцов на слои. В начале процесса сушки, когда возникает опасность растрескивания досок у внешней их пласти, ежесуточно (1—2 раза) откальывают тонкий слой (рис. 67, б, 1); по величине стрелы прогиба f , с учетом длины слоя l , определяется упругая деформация Y . Принципиально существенно при этом установить время возникновения Y_{\max} , после чего изгиб слоя начнет уменьшаться, достигая нулевого значения и затем изгибаются в противоположном направлении (II стадия сушки). При опасности возникновения раковин отрезанный из высушиваемого материала образец раскалывают на 3 слоя (рис. 67, б, 2) с замером стрелы прогиба $2f$ у двух крайних слоев, сложенных кромками вместе. Такой же замер выполняется затем после быстрого высушивания этих же слоев (с целью выравнивания их влажности) для определения остаточных деформаций O . Раскалывание на пять (рис. 67, б, 3) и более слоев проводят в экспериментальных целях. Слои откальывают с предварительной разметкой попеременно с обеих сторон образца ножом с прямолинейным лезвием одним ударом по ножу.

Для расчета величины растягивающих напряжений σ_p у поверхности материала по методу изогнутого слоя (рис. 67, б, 1) в первой стадии сушки предлагается приближенное соотношение [10]:

$$\sigma_p = \frac{8ERf}{[3(l^2 + 4f)^2]} \approx 2,7ERf/l^2 \approx cf/l^2, \quad (185)$$

где c — реологическая характеристика материала по модулю упругости в тангенциальном направлении.

Например, если $f=0,5$ см, $R=2$ см, $l=15$ см и $E=50\,000$ Па (5000 кгс/см 2), получим $\sigma_p=2,7 \cdot 50\,000 \cdot 2(0,5/15^2)=600$ Па (60 кгс/см 2).

Для брусковых сортиментов пригоден метод двузубой вилки (рис. 67, б, 4); пунктиром показано отклонение зубцов в I стадии сушки.

На рис. 67, в представлена схема по измерению упругих деформаций методом проявления следящей деформации в сочетании с раскалыванием образца на слои. В контрольном образце доски (рис. 67, в, 1) на средине его длины со стороны кромки выполняют узкий продольный пропил (круглой пилой на круглопильном или фрезерном станке). Протяженность пропила обычно до 0,4 м, глубина — до средины ширины доски. Для возмещения удаленной с опилками влаги пропил заполняют соответственно увлажненными опилками, а сверху по кромке образца закрывают упругой влагоизоляцией (ею защищают и торцы образца). Посредине длины в пропил вставляют индикатор для измерения ширины пропила у его кромок, прикрепляемый

к одной из них. Простейшая конструкция индикатора, выполненная из узкой полоски нержавеющей стали толщиной 0,5 мм, представлена на рис. 67, в, 2—3; один конец соответственно изогнутой полоски превращен в стрелку, а второй — в циферблат. В процессе сушки такого образца пиломатериалов индикатор показывает сперва частичное расширение кромок пропила, а во второй стадии — их сужение. При этом наглядно иллюстрируется интересный для раскрытия процесса и самый ответственный в технологическом отношении момент сушки — прохождение максимума упругими деформациями.

ГЛАВА 6. ПРОЦЕССЫ И РЕЖИМЫ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

35. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОНВЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ СУШКИ

При массовой сушке нагретым воздухом или продуктами сгорания древесных материалов и сортировок с разными требованиями к физическому содержанию сушильного процесса используют соответствующие теплотехнические приемы и методы, применяющиеся в теплообменной и сушильной технике других отраслей промышленности: поточные процессы непрерывного действия — конвейерный, барабанный, туннельный и др. При сушке древесины широко применяют типовые тепло- и массообменные процессы: противоточный, прямоточный, с поперечным током, а также их сочетания.

В противоточном процессе горячий сушильный агент (воздух) встречается с нагретым и уже сухим материалом и медленно его досушивает (рис. 68, а, б). Частично охладившийся сушильный агент в конце тепло- и массообмена омывает холодный влажный материал, нагревая и постепенно подсушивая его.

Противоточный процесс сушки применяют при высушивании досок, вызывающих опасение в отношении растрескивания. В этом процессе температура сушильного агента и его психрометрическая разность повышаются по мере снижения влажности древесины.

В прямоточном процессе нагретый сушильный агент встречается с холодным влажным материалом (рис. 68, а, в), поэтому происходит быстрый прогрев и интенсивная сушка материала в начале процесса. Перед окончанием его сухой материал омывается охладившимся влажным агентом.

Этот процесс применяют для высушивания древесных частиц, шпона и других малых по толщине быстросохнущих материалов, не вызывающих опасения в отношении растрескивания. Прямоточный процесс сушки протекает вначале очень интенсивно, а в конце приостанавливается, при этом влажность частиц

материала несколько выравнивается во влажной охладившейся газообразной среде.

Как прямоточный, так и противоположный сушильные процессы — туннельные, непрерывного действия. Они характеризуются постоянной энталпийей сушильного агента; температура по мокрому термометру практически остается неизменной по всей длине сушильного туннеля, т. е. в течение всего процесса сушки.

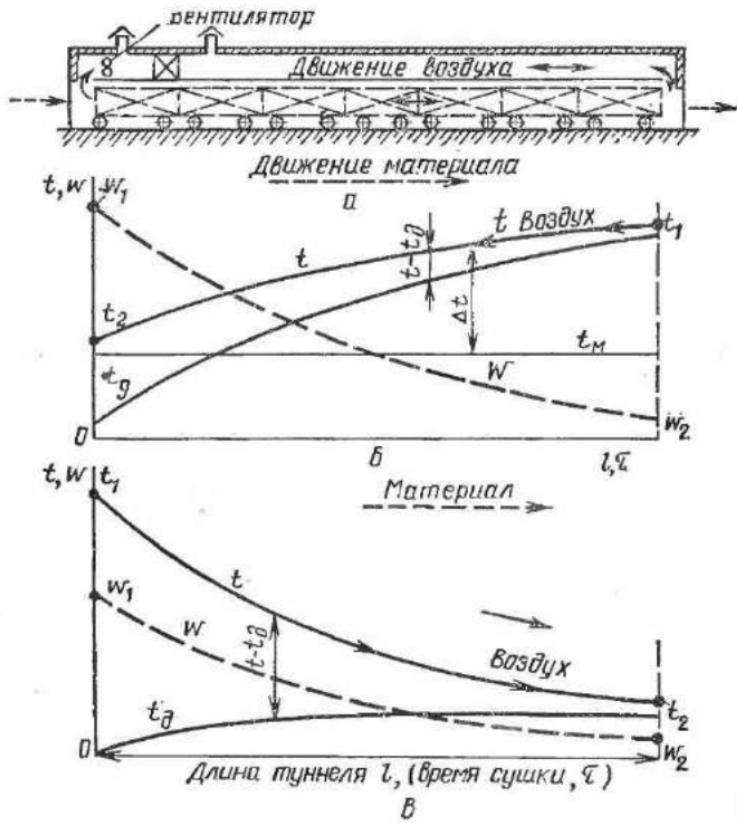


Рис. 68. Противоточный и прямоточный процессы сушки:
а — схема сушильного туннеля; б — противоточный процесс; в — прямоточный процесс

В случае применения поперечного тока возможно взаимодействие нагретого сушильного агента и материала при различных их параметрах. В условиях сушки древесины достигается беспрерывное регулирование процесса на различных стадиях. Одновременно возможна оптимальная во времени настройка отдельных ступеней процесса в соответствии с изменяющимся состоянием материала.

Двухпоточный процесс воспроизводит в одной и той же установке процессы противоточный, прямоточный и, возможно, с по-

перечным током. При этом в сушильном туннеле используют реверсивный вентилятор, подающий в течение заданных периодов поток сушильного агента в противоположных направлениях [11].

36. ПОНЯТИЕ О РЕЖИМАХ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Режимом сушки называется совокупность тепловлажностных воздействий сушильного агента (воздуха) на материал, обеспечивающих заданное качество и скорость его сушки. Режимы сушки излагаются в виде расписания температуры воздуха, его психрометрической разности и состояния материала, изменяющихся в процессе сушки. На этот процесс влияет также скорость движения воздуха по материалу, которая обычно остается постоянной в каждой сушильной установке.

Температура воздуха t предопределяет степень нагрева высушенного материала, влияя на его механические свойства и на влагопроводность, т. е. главным образом на процессы, протекающие внутри высушиваемого материала.

Психрометрическая разность Δ_t определяет величину теплового потока от воздуха к влажному материалу и, следовательно, скорость I испарения из него влаги [аналогично (33) и (143)]:

$$\Delta_t = t - t_m = Ir/\alpha, \quad (186)$$

где r — скрытая теплота испарения; α — коэффициент теплоотдачи.

При влажности поверхности материала ниже предела гигроскопичности в установившемся состоянии процесса можно написать для потенциала переноса тепла от воздуха к древесине:

$$t - t_d = \Delta_t (w_n - w_p)/(w_{n,r} - w_p), \quad (187)$$

где t_d — температура поверхности материала.

Психрометрическая разность Δ_t характеризует течение процесса на поверхности материала в зоне перехода влаги от материала в воздух.

Скорость воздуха по материалу также действует на интенсивность сушки поверхности влажного материала [коэффициент c в (143)]. С понижением влажности поверхности материала влияние скорости воздуха на интенсивность сушки падает. Однако этот параметр оказывает решающее влияние на равномерность просыхания материала в объеме штабеля, определяя качество сушки всей партии древесины. Не следует увеличивать скорость воздуха в начале и снижать в конце процесса сушки пиломатериалов — лучше, если поток воздуха будет прерывистым. В начале процесса интенсивность сушки пиломатериалов обычно даже стремится уменьшать. Чем тоньше

материал и короче нормативная длительность процесса, тем больше должна быть скорость воздуха в штабеле материала.

Жесткость режима сушки — понятие комплексное. При одинаковых размерах, породе и влажности материала более жестким следует считать режим сушки с большей психрометрической разностью.

Воздух одного и того же состояния создает более жесткие условия сушки (с возможностью даже растрескивания древесины) для толстого, более твердого, более влажного материала, т. е. с большей продолжительностью сушки, поэтому понятие жесткости режима можно оценить количественно, придав ему вид обобщенного режимного параметра сушки заданного материала, если совокупно учесть составляющие основные компоненты сушильного процесса.

Для сушки сосновых пиломатериалов с продолжительностью процесса 5 сут единичная жесткость режима сушки κ может быть приближенно оценена для первой стадии процесса в виде зависимости:

$$\kappa = a \Delta_t \sqrt[3]{\tau}, \quad (188)$$

где τ — нормативная продолжительность процесса, характеризующая сушильные свойства материала; a — обобщенный коэффициент, равный 0,041, если τ учитывается в часах, и 0,12, если τ в сутках; Δ_t — психрометрическая разность; при $\kappa=1$ и $\tau=5$ сут $\Delta_t=5^\circ\text{C}$. Например, если расчетная продолжительность сушки другого материала 9 сут, а $\Delta_t=8^\circ\text{C}$, $\kappa = 0,12 \cdot 8 \sqrt[3]{9} = 2$, т. е. этап режима будет в 2 раза жестче базового, для которого при $\tau=5$ сут в первой стадии процесса $\Delta_t=5^\circ\text{C}$.

В формуле жесткости режима сушки не показана температура; ее заранее ограничивают из-за отрицательного влияния на прочность древесины.

Классификация режимов сушки пиломатериалов

Общая особенность каждого отдельно рассматриваемого режима сушки — повышение температуры воздуха по мере просыхания пиломатериала при сохранении примерно на постоянном уровне в продолжение всего процесса температуры по мокрому термометру t_m психрометра; при этом влагосодержание d воздуха отклоняется незначительно, так же как и давление пара p_n . По ориентировочному значению t_m , Δ_t , d , p_n , а также парциальному содержанию массы пара g_n различают категории режимов сушки, приведенные в табл. 8.

Такая классификация отвечает термодинамической характеристике воздуха как сушильного агента, свойствам древесины как объекта сушки в наиболее ответственной (первой) стадии

8. Категории режимов сушки пиломатериалов

Категория процессов сушки	$t_m, {}^\circ\text{C}$	Δt	$d, \text{ г/кг}$	$p_{\text{П}} \frac{\text{kPa}}{\text{kgf/cm}^2}$	$g_p \text{ пара, \%}$
Атмосферная сушка (без подогрева воздуха)	<25	<10	<20	<3 <0,03	<2
Низкотемпературная тунNELьная (подогретым воздухом)	25—45	2—15	20—70	3—10 0,03—0,1	5
Нормативная — нормальная (нагретым воздухом)	45—70	3—30	70—300	10—30 0,1—0,3	20
Форсированная (значительно нагретым воздухом)	70—85	4—35	300—800	30—60 0,3—0,6	40
Паровоздушной смесью	85—96	5—35	800—6000	60—90 0,6—0,9	70
Перегретым паром	96—100	6—35	6000— ∞	90—100 0,9—1,0	>95

процесса, технологии ведения сушки и состоянию современной сушильной техники.

Режимы атмосферной сушки мало управляемы (см. гл. 13). Режимы камерной сушки по числу ступеней повышения температуры и психрометрической разности могут быть *одноступенчатыми, двухступенчатыми, многоступенчатыми*. Число ступеней n обусловлено требуемой различной тщательностью управления процессами при высушивании неодинаковых по опасности растрескивания сортиментов различной толщины и разных древесных пород и возможностью возникновения в них раковин. Число ступеней связывается с продолжительностью τ процесса (в сутках) следующим приближенным соотношением:

$$n = b \sqrt{\tau}, \quad (189)$$

где b — коэффициент, равный 1—1,3, в зависимости от свойств древесины.

Для материала с продолжительностью сушки $\tau=2 \dots 4$ сут достаточно двух ступеней; если $\tau=25$ сут, необходимо 5—6 ступеней, а при высушивании толстых дубовых досок или буковых заготовок (например, для обувных колодок), когда $\tau \approx 50$ сут, режим сушки состоит из 7—8 ступеней. Кроме того, добавляется одна, начальная, ступень (для предотвращения торцовочного растрескивания крупных свежеторцованных сортиментов), ко-

торая продолжается до $0,1t$ с психрометрической разностью около 0,6 от принятой для первой ступени сушки [35]. Этим же приемом, но в течение $(0,2-0,3)t$, уменьшают растрескивание сердцевинных досок.

В автоматизированном процессе возможны усовершенствованные режимы сушки с плавным повышением температур, т. е. с очень большим количеством ступеней.

Особенности режимов сушки пиломатериалов

Трудность высушивания пиломатериалов не в удалении влаги с поверхности, а в возможно интенсивном продвижении ее из центра к поверхности по толщине сортимента. Последнее достигается прогревом материала, способствующим увеличению коэффициента влагопроводности (см. рис. 62), поэтому все режимы сушки, кроме низкотемпературного, характеризуются высоким влагосодержанием воздуха при значительной температуре по мокрому термометру. Благу в воздухе кирпичных камер стараются удержать, сохранить в рабочем пространстве всеми возможными средствами.

Современные режимы сушки пиломатериалов характеризуются следующими особенностями:

1. По мере снижения влажности высушиваемой древесины повышается температура и увеличивается психрометрическая разность воздуха.

2. При сушке тонких, низкокачественных пиломатериалов и особенно пиломатериалов мягких пород, менее подвергающихся растрескиванию, применяются повышенные температуры и увеличенные психрометрические разности.

3. В сушильных камерах со слабой циркуляцией воздуха в начале процесса поддерживается повышенная (примерно полуторная) психрометрическая разность по сравнению с ее величиной в камерах со скоростной ($v>2$ м/с) циркуляцией воздуха по материалу.

4. Для массовой сушки пиломатериалов хвойных пород наиболее пригоден туннельный противоточный (однократный или двухстадийный) и комбинированные процессы, для очень тонких материалов и древесных частиц — прямоточный процесс.

5. При сушке толстых сортиментов и особенно сортиментов твердых пород в условиях повышенных температур механические показатели древесины снижаются, поэтому такие условия допускаются лишь для высушивания тонких пиломатериалов мягких пород, когда тепловое воздействие кратковременно. Сушка пиломатериалов перегретым паром ($t_m=96 \dots 100^\circ\text{C}$) не рекомендуется для промышленного применения из-за значительного ухудшения прочностных свойств древесины и снижения ее качества как материала. По той же причине не следует сушить толстые пиломатериалы паровоздушной смесью ($t_m=$

=85 ... 96° С) и по возможности воздерживаться от форсированных режимов сушки ($t_m=70 \dots 85^{\circ}\text{C}$).

6. Низкотемпературные режимы (t_m — до 45° С и Δ_t — до 15° С) применяют для высушивания экспортных пиломатериалов, в которых не допускается выплавление смолы, выпадение сучков и изменение натурального цвета (потемнение древесины хвойных пород или пожелтение буковой и березовой древесины от нагревания), а также до транспортной влажности для обезличенных потребителей. Эти же режимы рекомендуется применять для сушки древесины осины, в которой при высокой начальной влажности наблюдается сморщивание (коллапс) в условиях повышенных температур.

Недостатки низкотемпературных режимов: относительная длительность процесса и трудность сушки толстого материала до низкой влажности; не происходит стерилизации древесины от биологических поражений.

37. РЕЖИМЫ КАМЕРНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

В режимах сушки пиломатериалов изменение температуры и психрометрической разности воздуха координируется по следующим параметрам: во времени от начала сушки (см. рис. 63) с составлением заранее расписания температуры и психрометрической разности на весь процесс; по влажности материала, уменьшающейся в процессе сушки; в соответствии с характером и величиной возникающих в высушиваемом материале напряжений (см. рис. 65 и 67).

Более простой в выполнении первый метод — по расписанию t и Δ_t во времени, наиболее совершенный последний — по напряжениям, развивающимся в древесине, контролируемым в процессе сушки. Этот метод эффективен в особенности для сушки толстых сортиментов и тем более твердых пород, т. е. при большой продолжительности процесса с опасностью трескивания материала.

В табл. 9 приведены трехступенчатые режимы камерной сушки пиломатериалов (по ГОСТ 19773—74). Эти режимы базируются на втором из отмеченных методов регулирования — изменении параметров сушильного агента по мере снижения влажности древесины до заданной величины, при которой процесс сушки переводится на следующую ступень — с большей температурой t и психрометрической разностью Δ_t .

Номера режимов повышаются от 1 до 10 по мере последовательного снижения их жесткости. В пределах каждого номера режимы подразделяются по индексам А, Б, В, Г и Д с нарастанием психрометрической разности. Всего в табл. 9 содержится 44 режима, из них 13 характеризуются постоянством t_m (в пределах режима) и 31 — незначительным нарастанием t_m ; самый жесткий режим 1-Д и самый мягкий 10-Б.

9. Трехступенчатые режимы камерной сушки пиломатериалов

Индекс режима	Влажность древесины, %	Номер режима и параметры сушильного агента									
		1		2		3		4		5	
		<i>t</i>	Δ_t	<i>t</i>	Δ_t	<i>t</i>	Δ_t	<i>t</i>	Δ_t	<i>t</i>	Δ_t
А	>30	90	4	82	3	75	3	69	3	63	2
	30—20	95	7	87	6	80	6	73	6	67	5
	<20	120	32	108	27	100	26	91	24	83	22
Б	>30	90	5	82	4	75	4	69	4	63	3
	30—20	95	9	87	8	80	8	73	7	67	6
	<20	120	34	108	29	100	28	91	25	83	23
В	>30	90	7	82	6	75	5	69	5	63	4
	30—20	95	11	87	10	80	9	73	8	67	7
	<20	120	36	108	31	100	29	91	26	83	24
Г	>30	90	9	82	8	75	7	69	6	63	5
	30—20	95	13	87	12	80	11	73	10	67	9
	<20	120	37	108	33	100	31	91	28	83	25
Д	>30	90	11	82	10	75	9	69	8	63	7
	30—20	95	15	87	14	80	13	73	12	67	11
	<20	120	38	108	35	100	33	91	30	83	27

В табл. 10 приведен выбор нормальных и форсированных (цифра в скобках) режимов сушки пиломатериалов различных пород и толщин. Для узких сортиментов выбирают режим по ближайшей меньшей толщине. При сушке сырых нетолстых материалов в камерах с недостаточной циркуляцией воздуха применяют режим более жесткий по индексу, например 3-В вместо 3-Б.

Недостаточной считается циркуляция воздуха по материалу естественная, а также со скоростями 0,5; 0,75; 1 и 1,5 м/с при продолжительности сушки соответственно свыше 1000 ч, в пределах 1000—300, 300—80 и до 80 ч.

В результате применения форсированных режимов (номера в скобках, с тем же индексом) прочность древесины на скальвание и раскалывание снижается на 15—20%.

Режимы сушки по табл. 9 нельзя считать окончательно отработанными, желательно их усовершенствование. Нумерация режимов не согласуется с расчетной, планируемой продолжительностью сушки пиломатериалов (как это было в нормативных режимах, когда номер режима соответствовал ожидаемому времени сушки в сутках). Поэтому при практическом проведении режимов затруднительно расчетное установление вре-

Индекс режима	Влажность древесины, %	6		7		8		9		10	
		<i>t</i>	Δ_t								
А	>30	57	2	52	2	—	—	—	—	—	—
	30—20	61	5	55	4	—	—	—	—	—	—
	<20	77	21	70	20	—	—	—	—	—	—
Б	>30	57	3	52	3	47	2	42	2	38	2
	30—20	61	6	55	5	50	5	45	4	41	4
	<20	77	22	70	21	62	18	57	17	52	16
В	>30	57	4	52	4	47	3	42	3	38	3
	30—20	61	7	55	7	50	6	45	5	41	5
	<20	77	23	70	22	62	19	57	18	52	17
Г	>30	57	5	52	5	47	4	42	4	38	4
	30—20	61	9	55	8	50	7	45	6	41	6
	<20	77	25	70	23	62	20	57	19	52	18
Д	>30	57	6	52	6	—	—	—	—	—	—
	30—20	61	10	55	9	—	—	—	—	—	—
	<20	77	26	70	24	—	—	—	—	—	—

10. Выбор режимов сушки пиломатериалов
для различных пород древесины и толщины пиломатериалов

Порода	Режим сушки при толщине пиломатериалов, мм							
	до 22	свыше 22 до 30	свыше 30 до 40	свыше 40 до 50	свыше 50 до 60	свыше 60 до 70	свыше 70 до 85	свыше 85 до 100
Сосна, ель, пихта, кедр	2(1)-Д	3(1)-Г	3(1)-В	4(2)-В	4(2)-Б	5(3)-Б	6-В	7-Б
Лиственница	3(1)-В	4(2)-Б	5(3)-Б	5(3)-А	6-А	8-Б	9-Б	10-Б
Осина, липа, тополь	3(2)-Г	3(2)-Б	4(3)-Б	5(4)-В	6-В	7-В	8-Б	9-В
Береза, ольха	3(2)-Д	4(3)-Г	4(3)-В	5(4)-В	6-Б	7-Б	8-Б	9-Б
Бук, клен	4(2)-Г	5(3)-В	6(4)-В	6-Б	7-Б	8-Б	9-Б	—
Дуб, ильм	5(3)-Г	6(4)-В	6(5)-Б	7-Б	8-Б	9-Б	9-Б	—
Орех	5-В	5-Б	6-Г	6-Б	7-В	8-Б	8-Б	—
Граб, ясень	6-В	6-А	7-Б	8-В	8-Б	9-В	9-Б	—

Примечание. В скобках — номера форсированных режимов.

мени перехода на следующую ступень процесса; необходимо трудоемкое измерение текущей влажности каждого высушиваемого сортимента. Моменты перехода на следующую ступень не координируются опытным путем (см. рис. 67) с закономерностями напряжений в древесине во время сушки, характеризующейся большой изменчивостью ее реологических свойств. Для всех пиломатериалов дается только трехступенчатый процесс, что недостаточно для качественной сушки толстых сортиментов, тем более твердых пород, опасных в отношении растрескивания (наружного и внутреннего) и нуждающихся в более тщательной регулировке; для тонких же нерастрескивающихся материалов мягких пород достаточно применять 2 ступени и даже возможна 1 ступень (189). Представляют интерес замечания по этим режимам в зарубежной (польской) технической литературе [32].

38. РЕЖИМЫ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В ПРОТИВОТОЧНЫХ ТУННЕЛЯХ

В отличие от камерного процесса, позволяющего изменять параметры сушильного агента t и Δ_w в любой момент сушки, в противоточном процессе эти параметры определяются положением штабеля пиломатериалов относительно разгрузочной зоны, поскольку сушильный агент, начиная с этой зоны, последовательно проходит все штабеля материала, отдавая тепло и понижая свою температуру t и психрометрическую разность Δ_t ; температура по мокрому термометру t_m остается практически постоянной по всей длине туннеля (см. рис. 12).

Таким образом, во всех зонах (штабелях) параметры одной и той же массы сушильного агента, перетекающего в следующую зону туннеля навстречу движению материала, тесно связаны между собой, образуя во взаимодействии с материалом единый туннельный процесс сушки. В каждой зоне поддерживаются примерно постоянные режимные условия сушки, более мягкие, т. е. с понижением t и Δ_t воздуха по направлению к загрузочному (сырому) концу туннеля. Число зон соответствует числу штабелей по длине туннеля (при загрузке по одному штабелю).

В табл. 11 приведены режимы сушки пиломатериалов мягких хвойных пород в паровых и газовых противоточных туннелях до конечной влажности древесины 10—12 и 18—25% в условиях низкотемпературных, нормальных и форсированных процессов (ГОСТ 18867—73). Если загружают древесину с влажностью ниже 40%, психрометрическая разность на загрузочном конце туннеля должна соответствовать значениям камерных процессов, указанным в табл. 9 и 10.

Состояние воздуха в сушильном туннеле регулируют на выгрузочном (сухом) его конце, где нагретый воздух поступает

**11. Режимы сушки пиломатериалов мягких хвойных пород
в паровых и газовых противоточных туннелях**

Толщина пиломатериалов, мм	Состояние поступающего воздуха при конечной влажности материала				Психрометрическая разность выходящего воздуха при начальной влажности материала	
	10—12%		18—25%		более 50%	до 50%
	t	Δ_t	t	Δ_t		

Низкотемпературный режим ($t_m=40^\circ\text{C}$)

До 22	58	18	55	15	4	6
Свыше 22 до 30	55	15	53	13	4	6
„ 30 „ 40	53	13	51	11	3	5
„ 40 „ 50	52	12	50	10	3	5
„ 50 „ 65	51	11	49	9	2	4
„ 65 „ 75	50	10	48	8	2	4

**Нормальный режим ($t_m=67^\circ\text{C}$)
и форсированный режим — в скобках ($t_m=75^\circ\text{C}$)**

До 22	100 (110)	33 (35)	92	25	7	10
Свыше 22 до 30	95 (105)	28 (30)	88	21	6	9
„ 30 „ 40	92 (101)	25 (26)	85	18	5	8
„ 40 „ 50	88 (98)	21 (23)	83	16	5	8
„ 50 „ 65	85 (95)	18 (20)	81	14	4	7
„ 65 „ 75	83 (82)	16 (17)	79	12	4	6

к сухому материалу; желательно в интервале времени между загрузками штабелей температуру слегка повышать. На загрузочном (сыром) конце туннеля параметры воздуха беспрерывно меняются: между загрузками штабелей материала постепенно нарастают во времени t и Δ_t .

По величине психрометрической разности Δ_t'' на загрузочном конце, замеренной перед новой загрузкой штабеля, выявляют достаточность количества сушильного агента, подаваемого к материалу; с его увеличением значение Δ_t'' возрастает и наоборот.

В туннелях древесину высушивают по низкой (третьей) качественной категории. Однако при использовании дополнительных камер кондиционирования древесина будет отвечать второй качественной категории (мебель и аналогичные изделия).

Кроме древесины мягких хвойных пород в туннелях можно высушивать также березовые, осиновые и ольховые пиломатериалы.

Форсированные режимы применяют для сушки пиломатериалов для строительства (кроме силовых элементов) и в тарном производстве.

Нормальные режимы сушки (см. табл. 11) нуждаются в дополнительной отработке: для всех толщин материала в них показаны одинаковые температуры по мокрому термометру, в то время как для более толстого материала, находящегося в нагретом состоянии большее время, во избежание деструкции древесины (см. рис. 50) значение t_m должно быть пониженным. По существенному параметру t_m данные табл. 11 не согласуются с данными табл. 9 и 10. Очевидно, что один и тот же высушенный материал должен подвергаться по возможности одновременно, оптимальному, тепловлажностному воздействию как в камерах, так и в туннелях.

Низкотемпературный (мягкий) режим (см. табл. 11) не следует рекомендовать к применению в условиях однократной сушки, так как во время его проведения древесина не стерилизуется от, возможно, имеющихся в ней грибной инфекции и насекомых.

39. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Уточнение режимных параметров

Ввиду большого разнообразия имеющейся на предприятиях сушильной техники и неодинакового состояния действующих сушильных установок, условий их эксплуатации, физического содержания фактически реализуемых процессов сушки и их контроля, а также различной характеристики материала в каждом сушильном хозяйстве желательно изучать и совершенствовать сушильные процессы и накапливать опыт по оптимизации проводимых режимов сушки применительно к местным условиям.

При управлении процессом сушки правильнее оперировать параметрами t_m и Δ_t , а не t и Δ_t . Именно величина t_m определяет температуру древесины и, следовательно, ее сушильные параметры в наиболее ответственной, первой стадии сушки. Этот параметр более точно показывает также влагосодержание и энталпию воздуха. Он должен поддерживаться на протяжении процесса сушки или его стадиях, по возможности, постоянным; при этом упрощается техника контроля и практическое проведение режимов сушки пиломатериалов.

Во второй стадии сушки в качестве параметра влагопроводности древесины возрастающее значение приобретает темпера-

тура воздуха, поскольку $t_n \rightarrow t$ (см. рис. 63, б). В этой стадии определяющими параметрами процесса остаются $t_m + \Delta t$; при неизменном t_m параметром, регулирующим процесс, остается Δt .

Производственные наблюдения и контроль (по схемам на рис. 67 и 68) реальных процессов сушки показывают, что при высушивании толстых материалов с высокой начальной влажностью остаточные деформации (см. рис. 65, б, в) развиваются почти с самого начала процесса сушки; они снижают напряжения (т. е. упругие деформации Y), возникающие в материале, поскольку $Y = B - O$. Поэтому переход на вторую ступень сушки может быть назначен значительно раньше достижения материалом влажности 30% (см. табл. 9). На основании данных контроля внутренних деформаций (рис. 67, б, в) уже при текущей влажности 50—40% можно повышать Δt , сокращая таким путем общую продолжительность сушки. Чем выше начальная влажность материала, тем раньше, по данным ВНИИДМАШ и ММСК-1, этот переход.

Один из основных принципов сушки древесины как термолабильного материала — это требование *по минимальной его экспозиции в нагретом состоянии* при заданных для него допустимых температурах. Поэтому сокращению продолжительности процесса сопутствует более полное сохранение механических свойств древесины.

Прерывистые режимы камерной сушки

Особенности прерывистых режимов сушки заключаются в периодическом прекращении побудительного движения воздуха по материалу и в поддержании повышенной его температуры во время циркуляции (по сравнению с обычными режимами условиями). При этом имеется в виду тепловая инерционность древесины при кратковременных изменениях состояния среды; среднее гигротермическое воздействие воздуха на материал должно быть таким же, как и без перерывов (линия ABCDEM на рис. 69, а).

С применением прерывистых режимов для трудносохнущих сортиментов не только снижается расход электроэнергии вследствие периодического выключения вентиляторов [38], но также кардинально улучшается качество (равномерность влажности) высшенной древесины по объему штабеля, сокращается длительность процесса.

Во время перерыва циркуляции воздуха и прекращения подвода тепла внутрь штабеля приостанавливается испарение влаги с поверхности материала, но продолжается ее движение к поверхности (выравнивание) внутри его и снижение в нем напряжений. Затем наступает фаза интенсивной циркуляции воздуха с достижением равномерного просыхания древесины по всему объему штабеля. В режиме учитывается длительность

цикла $\tau_{\text{ц}}$ (например, 1 ч) и паузы $\tau_{\text{п}}$ или относительное время паузы Θ (например, 0,5) в этом цикле.

Длительность цикла зависит от древесной породы и стадии сушки: для твердых пород и в начале процесса циклы короче, чем для мягких и во второй стадии. Для упрощения регулирования длительность цикла можно принять в отдельном процессе постоянной.

Температурные «зубья» в действительности криволинейны; они аналогичны эпюрам деформаций при прерывистой нагрузке (см. рис. 36, б).

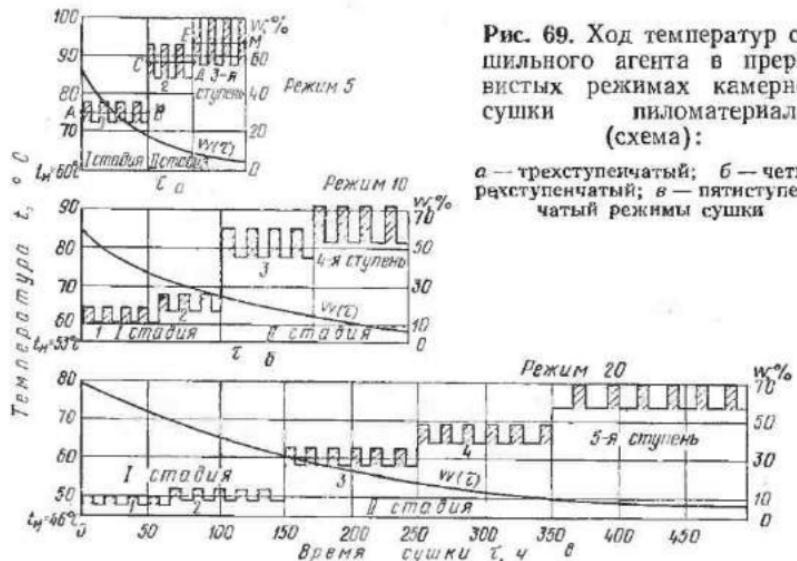


Рис. 69. Ход температур сушильного агента в прерывистых режимах камерной сушки пиломатериалов (схема):

а — трехступенчатый; б — четырехступенчатый; в — пятиступенчатый режимы сушки

Относительное время паузы $\Theta = \tau_{\text{п}}/\tau_{\text{ц}}$ тем больше, чем длительнее весь процесс τ . Для очень толстых сортиментов вентилятор останавливают на большее время соответственно желательному снижению усредненной скорости (количества) воздуха [см. (280) и рис. 87, а]. Если материал высушивают до низкой конечной влажности, относительное время пауз Θ повышают.

В качестве исходных ориентировочных значений применяют прерывистые режимы для материала при продолжительности процесса более 4—5 сут, величину Θ , равную 0,5; 0,6; 0,7, если соответственно $\tau=5$; 15 и 30 суткам (рис. 70). Температуру в первой стадии повышают на 2—8°С по сравнению с указанной в обычных режимах сушки; поддерживают также увеличенную в 1,5—2 раза психрометрическую разность, сохраняя t_m постоянной. Для автоматического отключения и включения электродвигателя вентилятора возможно использование командного прибора КЭП-12У или двух реле времени.

С применением таких перспективных режимов сушки мощные по подаче воздуха сушильные камеры эффективны как для

быстросохнущих материалов (непрерывная работа вентиляторов), так и для трудновысушиваемых сортиментов с большой продолжительностью процесса (прерывистая подача воздуха). Открывается возможность экономичной взаимозаменяемости камер для сушки различных сортиментов. Кроме того, сушка ускоряется за счет осцилляции температур в материале [39], а также увеличения числа ступеней режима (с более плавным его регулированием и своевременным переходом на новую ступень), повышается качество просыхания материала.

Закономерности отдельных параметров камерного процесса сушки с прерывистой циркуляцией воздуха даны на рис. 70.

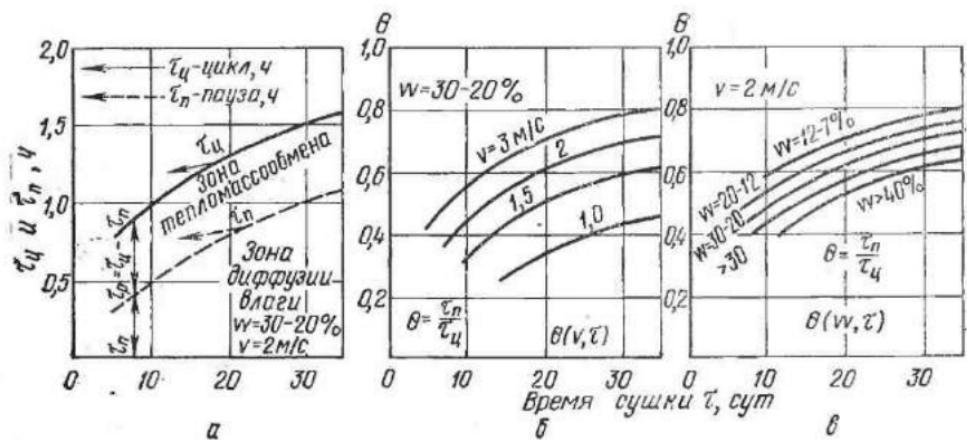


Рис. 70. Закономерности параметров процесса сушки во времени в режимах с прерывистой циркуляцией воздуха:

a — длительность паузы τ_p и цикла τ_q ; *b* — относительное время пауз θ в зависимости от скорости воздуха v по материалу; *c* — то же от текущей влажности материала

Время паузы τ_p тем больше, чем медленнее просыхает древесина, т. е. чем длительнее расчетный процесс сушки, что изображено графически на рис. 70, *a* оординатами до пунктирной кривой. Между двумя кривыми отложено время работы вентилятора τ_q , равное разности времени цикла и паузы, т. е. $\tau_p = \tau_q - \tau_n$.

При значительных скоростях воздуха (верхняя зона диаграммы) в фазе его циркуляции преобладает теплообменный процесс на поверхности материала над диффузионным вблизи поверхности, а при малых скоростях воздуха, когда $\Theta \rightarrow 0$, в материале протекают обычные тепломассообменные процессы, близкие к регулярным.

Относительное время пауз $\Theta = \tau_p / \tau_q$ в камерах с различными скоростями циркуляции воздуха показано на рис. 70, *b*. Кривые нанесены для материала с продолжительностью сушки до 30 сут.

На рис. 70, *c* представлена зависимость относительного времени пауз $\Theta = \tau_p / \tau_q$ от текущей влажности материала w с раз-

ной общей продолжительностью сушки τ . В упрощенных условиях проведения процесса величины Θ могут быть приняты постоянными в течение первой и отдельно во второй стадиях сушки или всего процесса. Диаграмма составлена для скорости воздуха по материалу $v = 2 \text{ м/с}$, для большей скорости кривые расположатся выше, т. е. возрастет Θ .

После отключения вентилятора влажность поверхности сортиента приходит во влажностное равновесие с состоянием небольшого количества неподвижного воздуха внутри штабеля материала с прекращением испарения. Поэтому после включения вентилятора поддерживается повышенная психрометрическая разность Δ'_t по сравнению с заданной Δ_t для данной ступени обычного режима сушки.

Отношение Δ'_t/Δ_t , зависит в основном от Θ и ступени сушки; обратная величина $\Delta_t/\Delta'_t = v$ обозначает *безразмерную психрометрическую разность*. Если $\tau_{\text{п}} \rightarrow 0$, то $\Delta'_t \rightarrow \Delta_t$.

С повышением Θ , т. е. относительного удлинения паузы ($\tau_{\text{п}}/\tau_{\text{д}}$), возрастает Δ'_t/Δ_t , или снижается $\vartheta = \Delta_t/\Delta'_t$.

В условиях испарения свободной влаги с поверхности материала сумма Θ и ϑ близка к единице, т. е.

$$\frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{д}}} + \frac{\Delta_t}{\Delta'_t} \approx 1,0 \text{ или } \Delta'_t = \Delta_t - \frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{д}} - \tau_{\text{п}}}. \quad (190)$$

По мере повышения гигроскопичности древесины в поверхностной зоне высушиваемого сортиента эта сумма несколько возрастает (см. рис. 70, в). Тогда в правой части второго соотношения (190) возникает множитель меньше единицы, снижающийся по мере возрастания равновесной температуры древесины.

В табл. 12 приведено ориентировочное расписание прерывистых камерных режимов сушки с 2—6 ступенями, в основном проверенных в производственных условиях. Содержание табл. 12 иллюстрируется на рис. 69, в верхнем ряду приведен график прерывистого режима 5, в среднем — 10 и в нижнем 20. Номера режимов (5, 6, 8 и т. д.) соответствуют примерной (расчетной) продолжительности сушки материала (в сутках), что создает наглядность в оценке режимов и удобство при пользовании ими.

Температура по мокрому термометру t_m постоянна в пределах каждого режима; процесс регулируется величиной психрометрической разности Δ'_t (или Δ_t), нарастающей по мере просыхания материала (соответственно возрастает t).

В табл. 13 приведены номера оптимальных режимов сушки. В камерах со слабой циркуляцией воздуха, а также при сушке

12. 2—6-ступенчатые режимы сушки — нормативные (Δ_t^N)
и с прерывистой циркуляцией воздуха (Δ_t); $V=1,5-2 \text{ м}^3/\text{с}$

Номера режимов	3	4	5	6	8	10
Температура по мокрому термометру t_m , °C	65	62	60	58	55	53
Длительность циклов и пауз $\tau_{\text{ц}}-\tau_{\text{п}}$, мин	—	60 — 30	60 — 30	60 — 30	60 — 30	60 — 30
Психрометрическая разность, °C	Δ_t^N	Δ_t	Δ_t^N	Δ_t	Δ_t^N	Δ_t
Влажность древесины, %:						
>50	—	—	—	—	—	—
>40	—	13	7	12	6	11
40—30	9	16	8	15	8	14
30—20	35	42	33	40	31	39
20—12	—	—	—	—	—	—
<12	—	—	—	—	—	40
						27

Номера режимов	12	15	20	25	30
Температура по мокрому термометру t_m , °C	50	48	46	44	42
Длительность циклов и пауз $\tau_{\text{ц}}-\tau_{\text{п}}$, мин	65 — 35	70 — 40	80 — 50	85 — 55	90 — 60
Психрометрическая разность, °C	Δ_t	Δ_t^N	Δ_t	Δ_t^N	Δ_t
Влажность древесины, %:					
>50	7	3,5	6	3	5
>40	9	4,5	8	4	7
40—30	11	6	10	5	9
30—20	33	21	30	19	28
20—12	38	25	36	23	33
<12	—	—	—	36	23
				35	21
					34
					19

Примечание. Δ_t — психрометрическая разность при прерывистой работе вентиляторов (в периоды циркуляции воздуха); Δ_t^N — психрометрическая разность в условиях непрерывной работы вентиляторов (нормативные режимы).

по III качественной категории номер режима принимается меньший.

Для приближенного планирования во времени процесса сушки по отдельным ступеням уменьшения влажности древесины нетолстых сортиментов можно пользоваться следующими длительностями ступеней (считая диапазон влажности 60—12% за единицу), полученными из (180):

13. Номера прерывистого режима камерной сушки пиломатериалов по II качественной категории в камерах со скоростной реверсивной циркуляцией воздуха

Толшина, мм	Номера режимов сушки					Толшина, мм	Номера режимов сушки				
	ели, пихты	сосны, кедра	березы, ольхи	бука, ясени, клена, лиственницы	дуба		ели, пихты	сосны, кедра	березы, ольхи	бука, ясени, клена, лиственницы	дуба
13—16	—	—	—	4	5	41—50	3—4	4	6	15	20
19—22	—	—	3	6	8	51—60	4—5	5	8	20	30
25—32	3	3	4	8—10	12	61—70	5—6	6	10	30	—
33—40	3	3	5	12	15	80—100	10—12	12	20	—	—

Диапазон снижения влажности, % . . . 60—12 60—40 40—30 30—20 20—15 15—12 12—8

Коэффициент продолжительности сушки 1,0 0,25 0,18 0,25 0,18 0,14 0,25

Например, для режима сушки 5 с продолжительностью процесса $5 \cdot 24 = 120$ ч получим длительности ступеней $120 = 30 + 22 + 30 + 22 + 16$, а при конечной влажности 8% следует добавить $0,25 \cdot 120 = 30$ ч.

Более точно процесс сушки пиломатериалов, подвергающихся растрескиванию, регулируется по величине фиксируемых внутренних деформаций (см. рис. 67).

Прерывистые режимы туннельной сушки

При проведении туннельного процесса сушки возникают технические трудности в регулировании количества сушильного агента при высушивании материалов различного состояния. Изменение частоты вращения асинхронных электродвигателей возможно с очень малой плавностью — 720, 960 и 1450 об/мин, когда мощность, отдаваемая вентилятору, ступенчато изменяется в отношениях 1 : 2, 4 : 8,1 (см. характеристики вентиляторов). Регулирование методом дросселирования потока воздуха обуславливает потерю энергии. Частая смена шкивов технически затруднительна, хотя более удовлетворительно решает задачу по регулированию количества подаваемого к материалу воздуха для сохранения заданной по табл. 11 Δ_t на загрузочном конце туннеля. Эти трудности отпадают с применением в туннелях прерывистых режимов сушки, аналогичных рассмотренным камерным процессам (см. табл. 12).

Производительность вентиляторов рассчитывают, исходя из эффективной сушки тонких пиломатериалов хвойных пород, для которых требуется наибольшее количество воздуха. При более длительном высушивании пиломатериалов средней толщины и тем более толстых это часовое количество воздуха будет в несколько раз завышенным (излишним). Именно исходя из этих условий для них целесообразно осуществлять циклические перерывы в работе вентиляторов с тем, чтобы за цикл к сортименту было подано требуемое количество воздуха (как показано далее, увеличенное или уменьшенное часовое количество воздуха нарушает противоточный процесс).

Относительное время пауз Θ тем больше, чем толще и плотнее высушиваемый материал, т. е. чем значительнее его продолжительность сушки. По аналогичной закономерности определяют максимальную длительность цикла $\tau_{\text{ц}}$. Величину Θ рассчитывают заранее и корректируют по значению Δ_t на загрузочном конце туннеля (желательно у второго штабеля) в момент перед закаткой сырого материала.

Относительное время пауз $\Theta = \tau_{\text{п}}/\tau_{\text{ц}}$ равнозначно удлинию туннеля, что необходимо при сушке более толстого материала. Возникает возможность эффективного применения высоких скоростей воздуха по материалу в условиях короткого туннеля. Следовательно, разными прерывистыми режимами можно оптимизировать процесс сушки разных сортиментов в условиях одинаковой подачи воздуха вентиляторами и длины туннелей.

В туннельном прерывистом процессе, как и при камерной сушке, поддерживают повышенную психрометрическую разность при сохранении на неизменном уровне (как в непрерывном процессе подачи воздуха для каждого сортимента) температуры по мокрому термометру.

В табл. 14 приведены режимы сушки хвойных пиломатериалов с конечной влажностью 10—12%, базирующиеся на проверенных прерывистых режимах камерной сушки. Аналогичные режимы сушки будут пригодны для различных типов сушильных туннелей с учетом значений фактических скоростей воздуха в штабелях пиломатериалов.

С применением прерывистых режимов открывается возможность перевода сушильных туннелей на еще более высокие скорости воздуха также и для тонких пиломатериалов, как это показано в табл. 14, с достижением более равномерного и интенсивного просыхания пиломатериалов по всему объему штабеля. Такой интенсифицированный режим работы сушильного туннеля предопределяет дополнительное повышение его производительности и качества сушки материала.

Так как понижение температуры воздуха по длине туннеля (без учета теплопотерь) обусловлено интенсивностью испарения влаги в каждой зоне (в штабеле материала), кривая температур t сушильного агента по длине туннеля будет отобра-

14. Параметры туннельных прерывистых режимов сушки пиломатериалов при различных, усредненных за цикл, скоростях воздуха

Толщина, мм	t_M	$\Delta' t$	$v=1,5$		$v=2$		$v=3$		$v=4$		$\tau_{ц}$
			$\Delta'' t$	Θ							
Менее 22	68	40	6	—	7	—	8	0,4	10	0,5	0,8
23—30	64	35	5	—	6	0,35	8	0,45	10	0,6	0,9
31—40	60	30	4	0,3	6	0,4	8	0,5	10	0,65	1,0
41—50	57	26	4	0,35	6	0,45	8	0,55	10	0,7	1,2
51—65	54	23	4	0,4	6	0,5	8	0,6	10	0,75	1,5
66—75	51	21	4	0,5	6	0,6	8	0,7	10	0,8	2,0

Примечание. $\Delta' t$ — психрометрическая разность на разгрузочном конце; $\Delta'' t$ — психрометрическая разность на загрузочном конце туннеля; v — усредненная скорость воздуха по материалу, м/с; $\Theta = \tau_{п} / \tau_{ц}$ — относительное время паузы ($\tau_{п}$ — длительность паузы, ч; $\tau_{ц}$ — длительность цикла, ч).

жать кривую сушки w , как это показано на рис. 71 соответственно кривыми ke и rp .

Без учета отклоняющихся значений коэффициента теплоотдачи и коэффициента испарения на поверхности материала от средних их значений можно принять для касательных к кривой температур и кривой сушки в соответственных точках a и c на рис. 71, б, в

$$a \frac{dt}{d\tau} = - \frac{dw}{d\tau}. \quad (191)$$

Таким образом, базовую кривую сушки rp можно выявлять по легко замеряемой температурной кривой ke .

Применение температур выше 100° С

Процессы высушивания тонких пиломатериалов (толщиной 13; 16; 19 мм) малоизучены. Для их сушки можно применять режимы с температурой выше 100° С с самого начала процесса. Сушка может быть как камерная, так и туннельная — одноступенчатая (с поперечным током), противоточно-прямоточная и прямоточная.

При температурах сушильного агента 200—350° С продолжительность сушки резаных сосновых тарных дощечек толщиной 8 мм 25—12 мин [10].

Продолжительность сушки единичных образцов сосновых дощечек толщиной 20 мм при температуре по мокрому термометру 90° С и по сухому 130; 150 и 180° С составляет соответственно

но 6,8; 5,3 и 3,4 ч [36]. Интенсивное потеря массы и прочности древесины происходит в начале нагревания практически одинаково в паровой и воздушной средах, но медленнее в вакууме и в среде азота [37].

В качестве сушильного агента наиболее эффективны продукты сгорания. Они могут быть получены при сжигании любых видов топлива, экономичных по местным условиям. При этом создается желательная для скоростного процесса температура

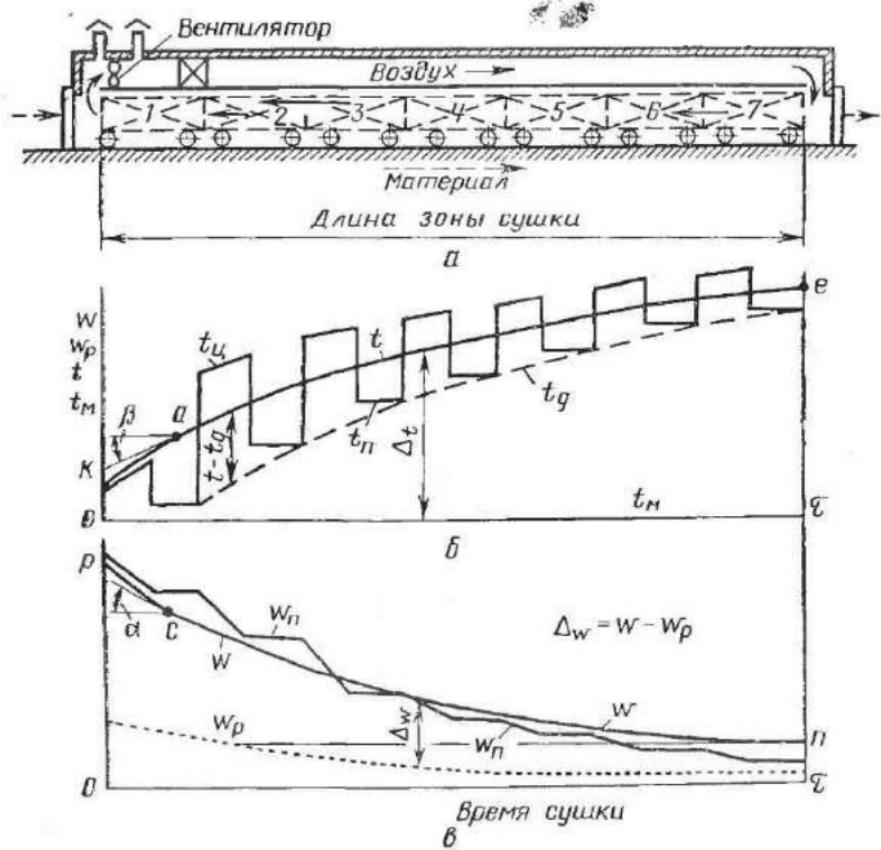


Рис. 71. Прерывистый противоточный процесс сушки:

а — схема сушильного туннеля; б — графики температур по длине туннеля; в — кривые сушки

сушильного агента. Температура по мокрому термометру может поддерживаться 65—75° С соответственно ее значениям в нормальном и форсированном режимах сушки. При таком процессе древесина в меньшей степени теряет прочность, чем при сушке перегретым паром, из-за меньшего нагрева влажной древесины в опасный период, т. е. в начале процесса, когда t_m , а следовательно, и t_d будут меньше (см. рис. 63, б). Если древесина высушивается не до низкой конечной влажности, то, интенсивно

испаряя влагу, она не перегревается и в конце сушки; затем часть влаги удаляется при охлаждении материала. Эти процессы сушки предназначены для высушивания нерастрескивающихся тонких сортиментов мягких пород.

Состояние разных сушильных камер и туннелей, зональное распределение температур, их регистрация, свойства древесины, ее назначение и т. д. очень разнообразны, поэтому указанные режимы сушки только исходные. При установлении оптимального режима сушки следует учитывать требования к качеству материала и местные условия, накапливая и используя опыт данного сушильного хозяйства.

Если при сушке пиломатериалов нельзя выдержать указанную в таблицах температуру по мокрому термометру, надо сохранить заданные психрометрические разности или, что почти то же,—насыщенности пара ф. Опыт сушки нужно непрерывно систематизировать, тщательно исследуя каждый раз результаты проведенного процесса.

Если приходится высушивать ответственные сортименты, для которых на предприятии нет проверенного режима сушки, их следует помещать сначала в небольшом количестве в камере с другим материалом, близким по ожидаемой продолжительности сушки.

40. О РАЗВИТИИ В ВЫСУШИВАЕМОМ МАТЕРИАЛЕ ТРЕЩИН И РАКОВИН

Основной дефект — наружные трещины — образуется в высушиваемом материале в результате неправильного режима сушки на первой стадии процесса или неудовлетворительного его проведения.

Появление другого вида брака сушки — покоробленности материала часто также считают результатом воздействия режимных условий. Это неверно. Как уже рассматривалось ранее (см. рис. 40 и 41), коробление происходит в случаях плохого зажатия досок, т. е. при неудовлетворительной их укладке в штабель. При жестких режимных условиях сушки коробление материала будет даже несколько меньшим, чем при мягких. В частности, доски с трещинами бывают меньше покороблены. Причина этого кроется в том, что при быстром просыхании поверхностной зоны материала образуется жесткий прямоугольный каркас, препятствующий деформации всего сечения материала — его покоробленности и усушке.

Наиболее трудно предупредить образование торцовых трещин в начале процесса сушки. Эти трещины характерны для всех сортиментов, особенно для пиломатериалов из твердых пород и крупных сортиментов мягких пород. Пластевые трещины появляются на наружной пласти досок; на внутренней пласти (со стороны сердцевины) их обычно не бывает. Все трещины,

возникающие при сушке, направлены радиально к годовым слоям.

Метод предупреждения появления наружных трещин заключается в смягчении режимных условий сушки, чтобы снизить интенсивность процесса, следовательно, градиент влажности у поверхности материала. Для этого уменьшают психрометрическую разность воздуха.

Внутренние трещины в виде раковин, которые возникают обычно в буковых и дубовых сортиментах, часто являются продолжением наружных трещин (рис. 72, а), образующихся в первой стадии сушки, затем смыкающихся (рис. 72, б). Однако размеры раковин увеличиваются, если в материале не возникало

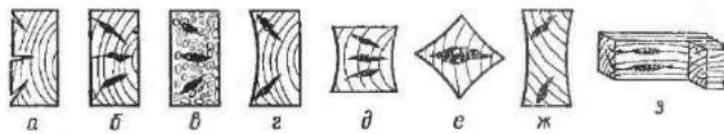


Рис. 72. Растрескивание древесины при сушке:

а — наружные трещины; б — заглубление наружных трещин и переход их в раковины; в — различные деформации круглых сосудов древесины в сечении доски; г — уточнение доски посередине ширины; д, е — раковины в брусках; ж — прикромочные раковины в досках промежуточной распиловки; з — приторцовые раковины

пластевых трещин, поскольку древесина в наружной зоне получит большее остаточное растяжение.

Если представить, что во влажном состоянии древесины клетки в поперечном сечении имеют круглую форму, то в конце сушки в наружной зоне сортимента они будут остаточно растянуты по направлению годовых слоев, примут овальную форму (рис. 72, в), в промежуточной зоне они останутся круглыми, а в центральной — станут сплюснутыми в направлении годовых слоев. Внутренние трещины, напоминающие раковины, образуются вследствие касательного (к годовым слоям) растяжения клеток древесины в наружной зоне доски и сжатия их во внутренней зоне в первой стадии сушки.

Наружные пласти сухих досок часто приобретают вогнутую форму (рис. 72, г). Древесина у кромок досок подвергается в первой стадии сушки остаточному растяжению и затем в сухом состоянии, когда остаточные деформации протекают замедленно, мало изменяет этот размер до конца процесса. По этой же причине углы квадратных брусков становятся острыми (рис. 72, д, е). В досках промежуточной распиловки направление наружных трещин и раковин приближается к диагональному (рис. 72, е, ж). На рис. 72, з показаны торцовые и приторцовые трещины.

Особенность усадки древесины в зоне раковины — повышенная ее величина по сравнению с усушкой; причина этого — значительные остаточные деформации сжатия древесины в центральной зоне в первой стадии сушки. Таким образом, источник

возникновения раковин во второй стадии сушки — в образовании значительных алгебраически суммируемых остаточных деформаций в поверхностной и центральной зонах сортимента соответственно на первой и второй стадиях сушки.

Отсюда следует принципиально важный способ предотвращения образования раковин: создание условий сушки, при которых нарастание остаточных деформаций на первой стадии процесса минимальное, а их уменьшение на второй стадии максимальное. Технические приемы осуществления такого способа сначала для задерживания, а затем стимулирования развития остаточных деформаций могут быть различными. Один из них на основании эмпирических производственных наблюдений иногда частично применяют на практике. Материал подвергают невысокому температурному воздействию в первой стадии сушки (атмосферной подсушке) и периодической промежуточной влаготеплообработке в камерах — во второй.

Особенно тщательно контролируют состояние материала при конечной влаготеплообработке. Именно на этой стадии упругие деформации растяжения в центральной зоне наибольшие (см. рис. 65, справа).

Раковины могут образовываться в древесине и после сушки и в деталях готовых изделий, если материал не прошел надлежащую конечную влаготеплообработку и влажность в центральной зоне осталась повышенной; при выравнивании этой влажности возникнет локальная усушка, упругие деформации растяжения возрастут; в случае превышения напряжениями предела прочности материал будет растрескиваться.

Из рассмотренного и особенно из анализа рис. 65 следуют существенные практические выводы. Для уменьшения (кроме того, необходимо соблюдение правил укладки) коробления пиломатериалов и снижения их усадки тонкие сортименты желательно высушивать на первой стадии с низкой t и большой Δt , лишь бы не произошло растрескивания древесины, а толстые, во избежание возникновения раковин — мягкими режимами, чтобы на первой стадии сушки остаточные деформации были минимальными.

Таким образом, в медленной и осторожной (в закрытых складах) атмосферной подсушке нуждаются толстые сортименты (особенно твердых пород).

В случае высушивания древесины до транспортной, т. е. повышенной влажности покоробленность значительно не проявляется. При одинаковой конечной влажности величина усадки будет тем меньше, чем больше был и дольше сохранялся перепад влажности по толщине в процессе сушки пиломатериалов. В частности, сухой воздух с высокой скоростью при низкотемпературной сушке снижает усадку и одновременно покоробленность. Наименьшая усадка (и покоробленность) — при сублимационной сушке.

К концу процесса сушки внутренние деформации постепенно снижаются. Однако в материале остается заметный перепад влажности по толщине — в центральной зоне влажность более высокая, чем в поверхностной (см. рис. 67, поз. *B, II*) и значительные упругие деформации (см. рис. 67, поз. *V, II*). Если такой материал направить в производство, то в момент механической обработки вследствие снятия неодинаково напряженных слоев он деформируется (коробится, извивается) в станках; кроме того, по мере постепенного выравнивания влажности детали в готовом изделии (см. рис. 67, поз. *O, II*) могут деформироваться.

Цель конечной влаготеплообработки (кондиционирования) — приданье высушенной древесине стабильности по размерам и форме, искусственное старение древесины применительно к условиям гигротермического равновесия при эксплуатации изготовленных из нее изделий. Практически задачу влаготеплообработки составляет выравнивание влажности и устранение упругих деформаций по всему объему высушенных досок или заготовок, а также выравнивание влажности древесины по объему штабеля пиломатериалов. Конечную влаготеплообработку не проводят лишь для тонких сортиментов мягких пород, высушиваемых по III (т. е. низшей) качественной категории.

Метод влаготеплообработки состоит в дополнительном прогреве пиломатериалов и увлажнении поверхностной зоны, чтобы выровнять влажность по толщине материала, повысить нагреванием пластичность древесины и этим ускорить протекание остаточных деформаций, снизив или даже устранив к концу влаготеплообработки упругие деформации.

В результате значительного увлажнения поверхностной зоны древесины возникает отрицательный перепад влажности, следовательно, влажностная деформация будет противоположна (*-B*) наблюдаемой в процессе сушки. Справа от точки 7 на рис. 65, *a* это отмечено резким повышением влажности в поверхностной зоне материала (кривая w_n), а на рис. 65, *b* кратковременным возрастанием сжимающих упругих деформаций в поверхностной зоне и растягивающих в центральной (заштриховано справа).

В период влаготеплообработки материал в центральной зоне достаточно (пластически) растягивается почти до состояния растянутой наружной зоны. Этот процесс частично уже протекал во второй стадии сушки. Возникающие при влаготеплообработке материала значительные упругие деформации способствуют быстрому развитию и выравниванию остаточных деформаций в центральной и поверхностной зонах. Величина растягивающей упругой деформации в центральной зоне материала U в стадии влаготеплообработки

поскольку, как показано стрелками на рис. 65, б справа,

$$O = B + Y. \quad (139)$$

Вследствие значительной величины упругой деформации в период влаготеплообработки в толстом материале могут возникнуть раковины, особенно если материал слабо подвергать дополнительному подогреву (т. е. не повышена его вязкость и пластичность).

Опыты по влаготеплообработке сосновых досок сечением 30×110 мм с влагоизолированными торцами в воде комнатной температуры, в среде насыщенного пара атмосферного давления и горячей воде ($t=96^{\circ}\text{C}$), показали, что поглощение влаги древесиной подчиняется общей закономерности [13]:

$$w = a 10^{\frac{bV}{c}}, \text{ или } \tau = \left(\frac{\lg w - c}{k} \right)^2 \text{ (мин)}, \quad (194)$$

где	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>k</i>
для холодной воды	9,8	0,032	0,99	0,032;
для насыщенного пара	9,6	0,027	0,98	0,027;
для горячей воды	8,8	0,017	0,95	0,017

Указанные зависимости выражаются в виде прямых, если на осях прямоугольных координат отложить корневую и логарифмическую шкалы (рис. 73).

Как видно из (194), кривые поглощения влаги отличаются от кривых сушки древесины квадратическим, а не линейным изменением во времени величины $\lg w$. Поглощаемая влага перемещается в древесине по капиллярным путям в виде жидкости (151).

В случае влаготеплообработки горячей водой возможно периодическое ее воздействие на материал, что может быть эквивалентно постоянному воздействию насыщенного пара. Общая продолжительность влаготеплообработки водой будет меньше, чем паром [10].

Экспериментальную зависимость между относительным повышением средней влажности древесины сосны Δ_w в воде и глубиной ее проникновения $R-x$ в древесину можно выразить уравнением

$$\Delta_w = a \left(\frac{R^2}{3} - x^2 + \frac{2x^3}{3R} \right), \quad (195)$$

где x — координата от средней плоскости доски; a — опытный коэффициент.

Из (195) видно, что при $x=R$, т. е. когда глубина проникновения воды равна нулю, $\Delta_w=0$; при $x=0$, т. е. когда вода про-

никает до средней плоскости материала, получаем уравнение параболы:

$$\Delta_w = aR^2/3. \quad (196)$$

В производственных условиях для влаготеплообработки используют поступающий из котла пар, добавляемый в камере к воздуху и создающий среду с насыщенностью пара, близкой к единице. Психрометрическая разность в кирпичных камерах поддерживается 2—3° С, а температура Δ 8° С выше, чем в последней ступени режима, но не более 100° С.

Продолжительность конечной влаготеплообработки определяется скоростью развития остаточных деформаций и выравни-

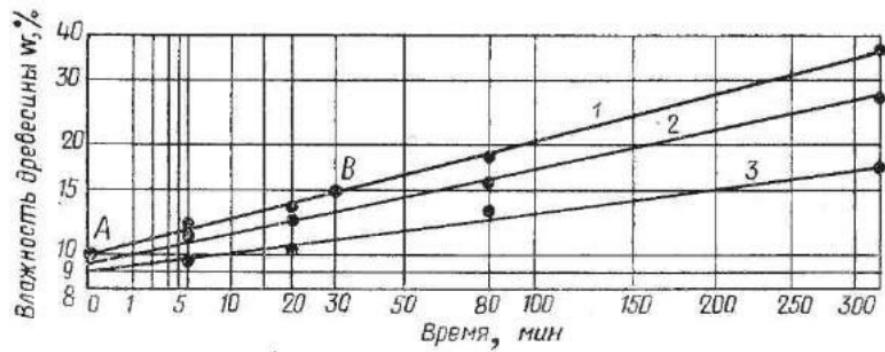


Рис. 73. Диаграмма увлажнения пиломатериалов:
1 — в горячей воде; 2 — в насыщенном паре; 3 — в холодной воде

вания влажности в направлении толщины материала. Она выражается следующей закономерностью, ч:

$$\tau_k = a + bT^2, \quad (197)$$

где a и b — коэффициенты; $T = 2R$.

Для материалов I, II и III категорий качества сушки для τ_k принимают коэффициенты соответственно 1,25; 1 и 0,7.

Практически продолжительность влаготеплообработки устанавливают методом контроля состояния материала по силовым образцам, которые немедленно после раскалывания (см. рис. 67, поз. К по вертикали ряд У), а также после выравнивания влажности (ряд О) должны оставаться прямыми. Ориентировочно она составляет 6—10% от продолжительности сушки (больше — для толстых сортиментов твердых пород).

ГЛАВА 7. АЭРОДИНАМИКА В СУШИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

42. СОДЕРЖАНИЕ И ЗНАЧЕНИЕ АЭРОДИНАМИКИ В ЛЕСОСУШИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

В связи с развитием лесосушильной техники в направлении почти исключительного использования метода конвективной сушки особое значение приобретает рассмотрение специфической аэродинамики воздушных потоков применительно к условиям рассматриваемого производства. При высушивании древесины на практике, а также проектировании сушильных установок необходимо решить ряд специфических задач, относящихся к аэродинамике воздушных потоков. Основные из них следующие.

На предприятиях ежедневно высушивают десятки и сотни кубических метров древесины с удалением большого количества влаги; вырабатывают пиломатериалы различных спецификаций, высушиваемые раздельно. Продолжительность сушки таких пиломатериалов несколько суток, поэтому размеры сушильных установок большие. Сами установки получаются в виде сушильных цехов. Их выполняют из ряда смежно расположенных сушильных камер или туннелей, работающих самостоятельно. Отсюда возникает сложность разработки для них аэродинамических систем с независимым их действием и регулированием.

Пиломатериалы высушивают уложенными в штабеля на горизонтальных, поперечных к длине досок прокладках размерами сечения 25×40 мм. Обычные габаритные размеры штабеля — длина, ширина и высота — составляют соответственно $6,6 \times 1,8 \times 2,6$ м. Воздушный поток, подводящий к материалу тепло и забирающий из него влагу, направляют в горизонтальные зазоры высотой до 25 мм между рядами досок, вдоль прокладок. Таким образом, путь воздуха по высушиваемому материалу значителен — 1,8 м. В этом состоит вторая аэродинамическая особенность сушки пиломатериалов.

Расчетная скорость воздуха по пиломатериалам хвойных пород толщиной 25 мм должна быть не менее 3 м/с. Для обычного по размерам штабеля с такими пиломатериалами необходимое количество воздуха $27 \text{ м}^3/\text{с}$ или около $100\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Следовательно, возникает потребность в подводе к материалу большого количества воздуха.

Главное требование к аэродинамике потока воздуха, подаваемого к материалу, — равномерность его раздачи в штабель как по длине, так и по высоте, причем с одинаковыми параметрами, чтобы материал просыхал равномерно во всем объеме штабеля. В этих же целях движение потока воздуха периодически изменяют на противоположное, т. е. осуществляют реверсирование.

Равномерная раздача воздуха при площади сечения его потока $6,6 \cdot 2,6 = 17,1 \text{ м}^2$ в стесненных условиях его подвода и отбора — технически сложная задача.

Подводимый к материалу воздух должен обладать высоким влагосодержанием при температуре воздуха (в начале сушки), близкой к температуре точки росы. Конденсация влаги в системе сушильной установки недопустима. По мере протекания сушки параметры воздуха изменяются (см. § 33). Это усложняет аэродинамическую систему.

Оптимальное количество воздуха, подаваемого к высушиваемому материалу, переменное; оно зависит в основном от характеристики материала (толщины, породы и др.). Эти зависимости окончательно еще не отработаны в сушильной технике, однако они один из главных, определяющих эффективность работы сушильных установок и качество выпускаемой продукции.

Известно несколько десятков различных по аэродинамическим характеристикам типов и конструкций сушильных установок, эксплуатируемых в промышленности. Для получения положительного эффекта при таком разнообразии оборудования требуется строгая унификация аэродинамических систем, а также типоразмеров сушильных установок различной мощности и назначения. Это относится как к разработке способов модернизации существующей лесосушильной техники, так и, в особенности, к разработке новой техники.

Техническая тенденция — отказ от сушильных камер со свободной (естественной) циркуляцией воздуха по высушиваемому материалу и переход на побудительную циркуляцию с правильно рассчитанной и выполненной мощной аэродинамической системой — требует углубленного изучения явлений и закономерностей, связанных с получением необходимых потоков воздуха в лесосушильных установках, а также со специфическим их перемещением в каналах и распределительных системах.

Следует также отметить наблюдаемое и вполне объяснимое усложнение аэродинамических систем по мере развития науки и техники. Так, широко применяется очень компактное по выполнению и простое в эксплуатации эжекционное побуждение движения воздуха в сушильных камерах.

43. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АЭРОДИНАМИКЕ ПРИМЕНЯТЕЛЬНО К СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ

Основные закономерности воздушного потока

При конвективной сушке воздух должен беспрерывно подводиться к нагревателю (калориферу, газоходу от топки), воспринимать тепло и переносить его к высушиваемому материалу, а затем поглощать и удалять выделившуюся из материала

влагу. Остановимся на некоторых основных положениях аэродинамики в применении к сушильной технике.

Разность давлений воздуха при действии вентиляторов в лесосушильных установках не превышает 980 Па (100 мм вод. ст.), т. е. менее 1% от барометрического давления; поэтому сжатие воздуха практически не учитывается. Если при перемещении в канале не изменяются ни количество, ни плотность воздуха, можно написать уравнение неразрывности:

$$V = Fv = F_1 v_1, \quad (198)$$

где V — объем воздуха, протекающего через сечения F и F_1 канала; v — средняя скорость в сечении F ; v_1 — средняя скорость в сечении F_1 .

Отсюда сечение канала или скорость в нем воздуха

$$F = V/v = F_1 v_1/v \text{ или } v = V/F = F_1 v_1/F. \quad (199)$$

При установившемся движении постоянного количества воздуха и отсутствии трения для двух сечений прямолинейного канала, перпендикулярных потоку, закон сохранения энергии выражается уравнением Даниила Бернулли:

$$\begin{aligned} H &= H_{ct_1} + \frac{\rho v_1^2}{2} = H_{ct_2} + \frac{\rho v_2^2}{2} = \text{const} \\ [H &= H_{ct_1} + \frac{\rho v_1^2}{2g} = H_{ct_2} + \frac{\rho v_2^2}{2g} = \text{const}], \end{aligned} \quad (200)$$

где H_{ct_1} и H_{ct_2} — статическое давление в первом и втором сечении канала, Па (мм вод. ст.); v_1 и v_2 — скорости воздуха в первом и втором сечении, м/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с².

Статическое давление представляет собой избыточное или недостающее давление воздуха в канале, камере и т. д. по сравнению с атмосферным; отрицательное давление называется разрежением. Величина $\rho v^2/2 = H_d$ (или $\rho v^2/2g = H_d$) представляет собой динамическое давление в паскалях (или мм вод. ст.). Алгебраическая сумма статического и динамического давлений составляет полное H давление:

$$H = H_{ct} + H_d. \quad (201)$$

Динамическое давление всегда положительное. Таким образом, если статическое давление H_{ct} отрицательное, получим $H < H_d$, при $H_{ct} > H_d$ полное H будет отрицательным и тогда по (201)

$$-H = H_d + (-H_{ct}). \quad (202)$$

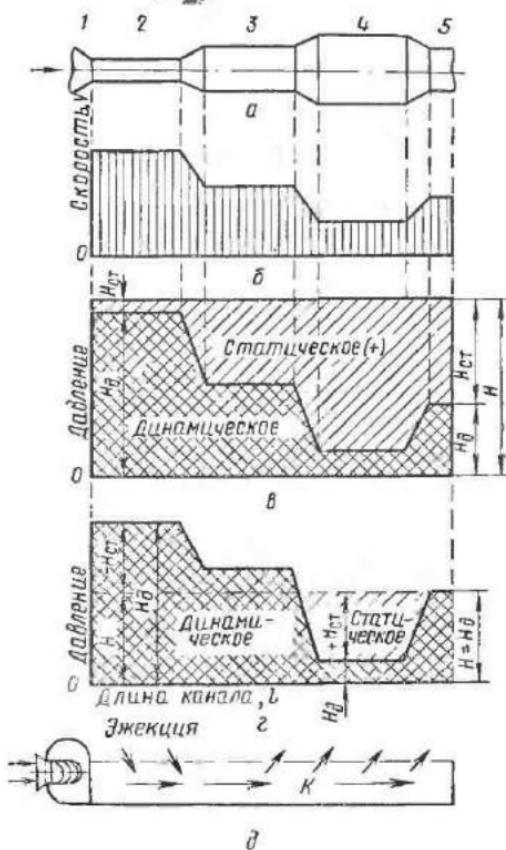
Указанные зависимости представлены графически на рис. 74. В канале переменного сечения без учета сопротивлений (рис. 74, а) перемещается воздух постоянной плотности. Ско-

ности воздуха на участках 2, 3, 4 и 5 канала обратно пропорциональны [см. (199)] их сечениям (рис. 74, б). Если справа за участком 5 есть сопротивление и весь канал находится под избыточным давлением, для каждого его участка будет справедливо $H = H_{\text{ст}} + H_d$ с различными положительными значениями $H_{\text{ст}}$ и H_d (рис. 74, в). Если из участка 5 воздух вытекает в атмосферу, статического давления в нем нет ($H_{\text{ст}}=0$) и $H = H_d$, как это показано справа на рис. 74, г. При этом в участке 4 (с малым динамическим давлением) возникает положительное статическое давление ($+H_{\text{ст}}$), а на участке 2 (с большим динамическим давлением) создается отрицательное статическое давление ($-H_{\text{ст}}$). Поэтому для участка 4 будет $H = H_d + H_{\text{ст}}$, а для участка 2 $H = H_d - H_{\text{ст}}$.

Отсюда согласно схеме рис. 74, г следует практический вывод: если в канале на участках 2 и 4 сделать маленькие отверстия, в участке 2 будет обнаружен подсос воздуха в канал, а в участке 4 — вытекание

Рис. 74. Графическая иллюстрация уравнения Бернуlli:

a — канал переменного сечения; *б* — эпюра скоростей воздуха по длине канала; *в* — эпюра давлений по длине канала при подпоре $H_{\text{ст}}$ на выходе; *г* — то же без подпора; *д* — эжекция воздуха в коротком напорном канале *к* у вентилятора (слева)



его из канала (поскольку участок 2 окажется под разрежением, а участок 4 под давлением). С изменением количества, т. е. скоростей воздуха, протекающего в канале, произойдет перераспределение давлений, показанных на эпюрах рис. 74, в, г.

Таким образом, при постоянном полном давлении по уравнению (200) и рис. 74, в меньшей скорости воздуха по длине канала соответствует большее статическое давление, и наоборот. Кроме того, исходя из постоянства (в идеальном канале — без трения) полного давления $H = \text{const}$ на участках канала с высокими скоростями воздуха, т. е. большими H_d , может возникнуть отрицательное статическое давление (участок 2 на рис. 74, г).

Именно этим объясняется засасывание воздуха в распределительный канал, идущий от нагнетательного (напорного) отверстия вентилятора. Если этот канал большого диаметра и с достаточным количеством отверстий, воздух будет засасываться после вентилятора. Наибольшая скорость выхода воздуха будет из самого отдаленного от вентилятора отверстия (если канал сравнительно недлинный). То же происходит в лесосушильных камерах при распределении воздуха, поступающего из канала в штабель материала.

Ламинарное и турбулентное движение воздуха

В технике различают два вида движения воздуха: ламинарное (параллельное, струйчатое) и турбулентное (завихренное, беспорядочное). При ламинарном движении скорость воздуха увеличивается к центру сечения канала, распределяясь в круглом канале по параболической кривой; теплоотдача воздуха в стенке будет незначительной. Турбулентное движение создает непрерывно меняющиеся по сечению канала скорости воздуха; теплоотдача при этом резко повышается. В одном и том же канале могут быть оба этих вида движения воздуха: ламинарное — в углах канала, на прямолинейных участках при малых скоростях воздуха и турбулентное — в середине сечения канала, на поворотах, у заслонок и т. д. Турбулентное движение возникает, если критерий Рейнольдса $Re > 2300$; при Re до 1000 движение ламинарное, а при Re от 1000 до 2300 — неустойчивое. При этом: $Re = vd/v$ (см. табл. 7). Здесь v — кинематическая вязкость воздуха, зависящая от температуры, имеет следующие значения:

$t, ^\circ C$	0	20	50	100	150	200	300	500	800
$v \cdot 10^6, m^2/c$	13,3	16,2	17,9	23,0	28,5	34,5	47,6	77,5	133

Кинематическая вязкость воздуха в работающих камерах в среднем $v \approx 2,0 \cdot 10^{-5}$. Турбулентное движение воздуха предпочтительнее — возрастает теплоотдача.

Для каналов прямоугольного поперечного сечения со сторонами a и b величина эквивалентного диаметра d_{ek} будет:

$$d_{ek} = 2ab/(a+b). \quad (203)$$

Пример. Выявить минимально допустимую скорость воздуха ($Re > 2300$) с температурой $70^\circ C$ в штабеле пиломатериалов по направлению вдоль прокладок при высоте канала 20 мм между шероховатыми поверхностями досок (частично прогибающихся в штабеле при толщине прокладок 25 мм) и расстоянии между прокладками 1 м.

Находим эквивалентный диаметр канала: $d_{ek} = 2 \cdot 1 \cdot 0,02 / (1 + 0,02) = 0,04$ м. Приняв это значение d_{ek} и используя соотношение для Re , определим минимальную скорость воздуха в штабеле пиломатериалов:

$$v = \text{Rev}/d = 2300 \cdot 2/(0,04 \cdot 100\,000) = 1,2 \text{ м/с.}$$

Учитывая, что вблизи прокладок возможно ламинарное движение воздуха, установим минимально допустимую его скорость внутри штабеля 2 м/с. В этом случае $Re \approx 3000$, т. е. будет больше критического его значения. В случае применения более тонких прокладок минимальные скорости воздуха в штабеле должны быть соответственно выше.

Критерий Рейнольдса позволяет установить динамическое подобие потоков воздуха на действующих моделях сушильных камер. При этом надо соблюсти условия: 1) уменьшенная модель и камера нормальных размеров (например, проектируемая вновь) должны быть геометрически подобны; 2) Re для исследуемых узлов должен быть одинаковым. Если $Re > 100\,000$, наступает автомодельность потоков, при этом необходимость в соблюдении второго требования отпадает. При изучении на моделях тепловых процессов, как более сложных, нужно соблюдать также равенство других критериев подобия (см. табл. 7).

Аэродинамическое сопротивление каналов

При движении по каналу часть давления воздуха теряется из-за трения внутри потока и о стенки канала, а также из-за местных сопротивлений, например на удары при сужении каналов, завихрения на поворотах и т. д. Оба эти вида потерь H_n выражаются в долях динамического давления:

$$H_n = \frac{\rho v^2}{2} \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma \xi \right), \quad (204)$$

где λ — коэффициент трения, применяемый в приближенных расчетах для воздуховодов (металлических 0,015; оштукатуренных 0,03; кирпичных неощтукатуренных и керамических 0,04); l — длина канала, м; d — диаметр круглого воздуховода или эквивалентный диаметр прямоугольного, м; ξ — коэффициент местных сопротивлений.

Например, потери на трение в прямом металлическом воздуховоде длиной 10 м, диаметром 0,5 м при скорости воздуха 14 м/с и его плотности $\rho = 1 \text{ кг}/\text{м}^3$ равны

$$H_n = \frac{1 \cdot 14^2}{2} \cdot 0,015 \cdot \frac{10}{0,5} = 100 \cdot 0,3 = 30 \text{ Па (3 мм вод. ст.)}$$

Величины местных сопротивлений принимают следующие:

1. Поворот канала круглого или квадратного сечения на 90° при радиусе внутреннего его закругления $r/b = 0,0; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5$ от диаметра (стороны) канала, соответственно: $\xi = 1,1; 0,7; 0,5; 0,25; 0,18$ (рис. 75, а).

2. Поворот прямоугольных каналов на 90° (с учетом в качестве множителя коэффициента по п. 1) при $h/b = 0,25; 0,5; 1; 1,5; 2$, соответственно: $\xi = 1,8; 1,5; 1,0; 0,7; 0,5$ (рис. 75, б).

3. Колено круглого или квадратного канала с углом $\alpha=90^\circ$; 120° ; 150° , соответственно: $\xi=1,1$; $0,55$; $0,2$ (рис. 75, *в*).

4. Прямоугольное колено со скосенным внутренним углом, при длине l скоса $0,1$ и $0,25$ от ширины b канала: $\xi=0,8$ и $0,5$ (рис. 75, *г*).

5. Внезапное сужение с отношением сечений меньшего f к большему F (по скорости в меньшем сечении):

f/F	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
ξ	0,5	0,45	0,35	0,25	0,15	0,0 (рис. 75, <i>д</i>)

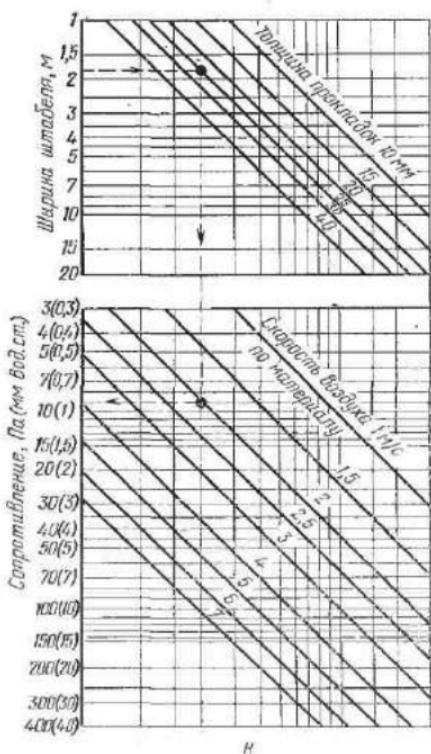
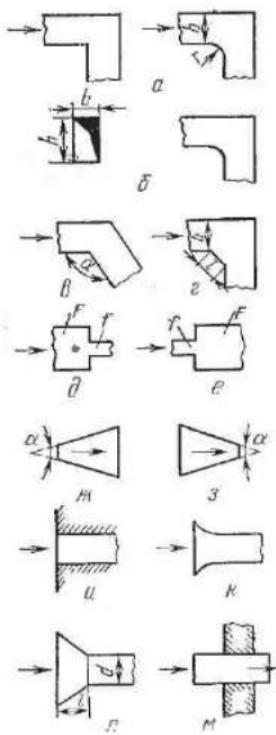


Рис. 75. Аэродинамические местные сопротивления

6. Внезапное расширение с отношением сечений меньшего f к большему F (по скорости в меньшем сечении):

f/F	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
ξ	1,0	0,81	0,49	0,25	0,09	0,00 (рис. 75, <i>е</i>)

7. Постепенное расширение в виде диффузора прямоугольного сечения с центральным углом раскрытия $\alpha \leq 20^\circ$ не учитывается. При $\alpha \geq 40^\circ$ можно принимать значения ξ по скорости в меньшем сечении:

f/F	0,80	0,60	0,55	0,50	0,44	0,40
	0,04	0,12	0,20	0,25	0,31	0,36 (рис. 75, <i>ж</i>)

8. Постепенное сужение в виде конфузора любого сечения с центральным углом α и отношением меньшего сечения к большему f/F , когда значение ξ учитывается также по скорости в меньшем сечении,

$$\xi = 0,5 \sin \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{f}{F} \right).$$

При $\alpha < 45^\circ$ его в технических расчетах не принимают во внимание. Предельный угол конфузора ($\alpha = 180^\circ$) отвечает внезапному сужению потока воздуха (рис. 75, з).

9. Вступление воздуха в прямой канал, заделанный заподлицо со стеной: $\xi = 0,3$ (рис. 75, и). Вступление воздуха в прямой канал с закругленными краями для плавного входа воздуха: $\xi = 0,1 - 0,2$ (рис. 75, к). Вступление воздуха в прямой канал с входным растробом $\alpha = 45^\circ$, длина которого l равна диаметру d канала: $\xi = 0,05$ (рис. 75, л).

10. Вступление воздуха в трубу с выступающей острой кромкой: $\xi = 1$ (рис. 75, м).

11. Свободный выход воздуха из трубы соответствует потере динамического давления: $\xi = 1$ (рис. 75, м — справа).

12. Сопротивление каналов в штабеле пиломатериалов, уложенных без щлазий, длиной 1,8 м на прокладках толщиной 25 мм [42] с учетом скорости воздуха между досками толщиной T :

T , мм	25	35	50	70
ξ	2,7	2,8	2,9	3,0

Сопротивление штабеля может быть выражено непосредственно в паскалях (в миллиметрах водяного столба) [III], как показано на рис. 75, н.

Пример. Для ширины штабеля 1,8 м на прокладках толщиной 25 мм при скорости воздуха 2 м/с (показано стрелками) сопротивление равно 9 Па (0,9 мм вод. ст.).

Мероприятия по уменьшению потерь давления

В местах поворота каналов внутренние углы должны быть скруглены по радиусу не меньшему, чем половина ширины канала. При значительных скоростях воздуха на поворотах каналов желательно поставить изогнутые под углом 107° по радиусу круга направляющие лопатки (6—8 в каждом углу).

Все входные отверстия для воздуха (в трубу, канал и т. д.) следует скруглять от бортовой трубы наружу или установкой входного растроба для уменьшения местного сопротивления входа.

В местах внезапного расширения и сужения каналов надо предусматривать переходные диффузоры и конфузоры. Центральный угол диффузора не должен быть более 8° , скорость воздуха в диффузоре при этом постепенно понижается, поток не отрывается от стенок и динамическое его давление превращается в статическое.

Работу, затрачиваемую на передвижение воздуха в канале, определяют произведением полного давления H [Па (мм вод. ст.)] на объем перемещаемого воздуха V ($\text{м}^3/\text{с}$). Давление H выражает силу на 1 м^2 сечения потока воздуха, а V , ($\text{м}^3/\text{с}$) — путь перемещения воздуха в трубе сечением 1 м^2 . Тогда HV определяет работу в единицу времени, т. е. мощность. Таким образом, мощность, расходуемая на перемещение потока воздуха, без учета КПД вентилятора $N = HV/1000$ ($HV/102$) кВт. Отсюда следует, что в целях экономии энергии вентилятор желательно установить до калорифера, чтобы через него проходил ненагретый воздух, т. е. меньшего объема.

44. ЕСТЕСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОЗДУХА ПРИ СУШКЕ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Понятие о гидравлической теории движения газов

Под естественным (свободным) движением воздуха подразумевается перемещение его вследствие изменения плотности. Плотность воздуха изменяется [см. (26)] при нагревании (например, в калорифере), охлаждении (стенами сушильной камеры), увеличении влагосодержания при испарении им влаги из

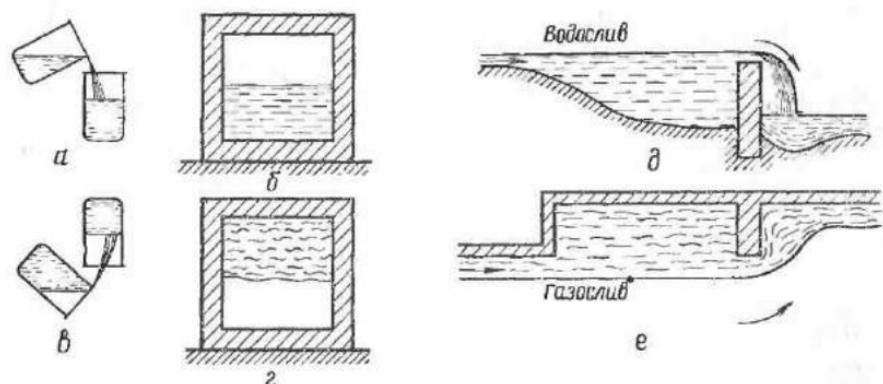


Рис. 76. Движение газов и жидкостей различной плотности:
а и б — более тяжелых; в и г — более легких; д — воды через плотину; е — нагретого газа через переключку

материала, подмешивании к нему воздуха иной температуры и насыщенности пара.

Основные положения гидравлической теории движения газов могут быть сформулированы так: движение легкого газа в тяжелом подобно движению легкой жидкости в тяжелой; нагретый поток газов есть обращенная река.

На рис. 76, а показано переливание в сосудах углекислого газа, а на рис. 76, в — водорода в воздушной среде; аналогично текут газы в каналах. На рис. 76, б изображено движение

тяжелого газа (или жидкости) в части сечения канала, а на рис. 76, *г* — движение в канале более легкого (нагретого) газа. Горячие газы, движущиеся по каналу с излишним сечением, заполняют лишь верхнюю его часть (рис. 76, *г*).

Для задерживания горячих (т. е. легких) газов устраивают перемычку аналогичную плотине для задержания воды, но в опрокинутом виде. Избыток горячих газов будет переливаться через перемычку снизу вверх подобно тому, как излишек воды переливается сверху вниз через плотину (рис. 76, *д*); газ перемещается в обратном направлении (рис. 76, *е*) по отношению к движению воды.

Статические давления нагретого воздуха по высоте камеры

В замкнутом пространстве сушильной камеры с нагретым воздухом давление изнутри на стены и перекрытие распределяется следующим образом.

При расположении нейтральной плоскости (т. е. горизонтальной плоскости с одинаковым давлением внутри камеры и снаружи) $O-O$ (рис. 77, *а*) на середине высоты камеры дав-

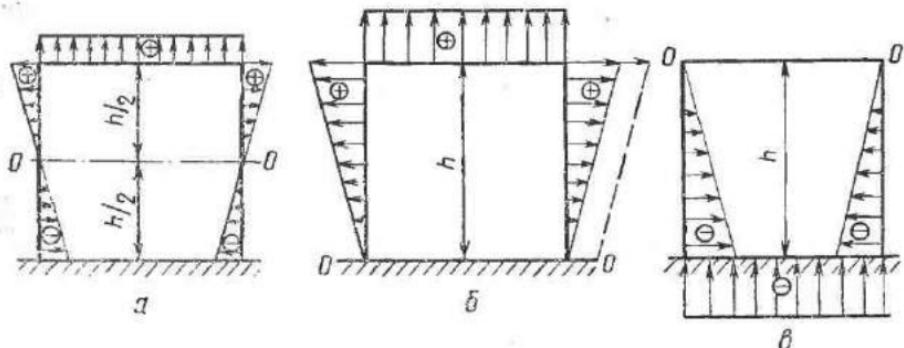


Рис. 77. Распределение давлений на ограждения камеры с нагретым воздухом при уровне нейтральной плоскости $O-O$:
а — на середине высоты камеры; *б* — внизу камеры; *в* — вверху камеры

ление в камере по сравнению с наружным равномерно нарастает вверх от нейтральной плоскости, достигая у перекрытия наибольшего положительного значения $\Delta_h = \frac{h}{2}(\rho_1 - \rho)$, где h — высота камеры, м; ρ_1 и ρ — соответственно плотности воздуха наружного и в камере.

Книзу от нейтральной плоскости давление равномерно понижается, достигая максимального отрицательного значения у пола. Если разность $\rho_1 - \rho$ по высоте камеры постоянна, эпюра этих давлений изобразится в виде треугольников. Поэтому

при неплотных стенах и дверях холодный воздух подсасывается в камеру внизу, а нагретый вытекает из ее верхней части.

Нейтральная плоскость обычно располагается на уровне большого отверстия, соединяющего камеру с атмосферным воздухом, если скорость воздуха в нем близка к нулю. В противном случае нейтральная плоскость смещается. При расположении нейтральной плоскости у пола (рис. 77, б) в камере образуется избыточное давление, величина которого у перекрытия наибольшая, чем при ином положении нейтральной плоскости в пределах высоты камеры. Это давление стремится поднять перекрытие камеры. При нагнетании же воздуха в камеру вентилятором в нее может создаться избыточное давление и, следовательно, утечка воздуха через неплотности даже в нижней части камеры (пунктирная линия справа на рис. 77, б). *

Отрицательное давление в камере (рис. 77, в) образуется при расположении вытяжного отверстия в верхней части и, тем более, в перекрытии камеры.

Скорость v (м/с) истечения воздуха из камеры или канала через отверстие при отсутствии в нем сопротивления определяется из уравнения (200):

$$v = \mu \sqrt{\frac{2H_d}{\rho}} = 1,41 \mu \sqrt{\frac{H_d}{\rho}}, \quad (206)$$

где μ — коэффициент истечения, который для нагретого воздуха близок к единице.

Пример. Выявить скорость истечения воздуха под действием температурного напора из сушильной камеры высотой 4 м через находящееся сверху отверстие при плотности воздуха в камере $0,9 \text{ кг}/\text{м}^3$, а снаружи $1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$. Если нейтральная плоскость находится на высоте 2 м от пола (рис. 77, а), получим давление сверху камеры

$$H_d = \frac{h}{2} (\rho_1 - \rho) = 2 (1,3 - 0,9) = 8 \text{ Па} (0,8 \text{ мм вод. ст.}).$$

При этом скорость истечения воздуха

$$v = 1,41 \sqrt{H_d/\rho} = 1,41 \sqrt{8/0,9} = 4,2 \text{ м/с}.$$

При площади щелевого отверстия только 1 дм^2 из камеры в течение часа утечет $0,042 \cdot 3600 = 150 \text{ м}^3$ воздуха, что резко нарушит режим ее действия.

Естественная циркуляция воздуха в сушильной камере

Во всех случаях использования небольших сушильных камер с естественной циркуляцией важное значение имеет расположение калорифера по высоте относительно высушиваемого материала. При размещении калорифера сбоку штабеля теп-

лый воздух омывает материал только в расположенной выше части штабеля, ниже сушка не будет происходить. Для полного омывания штабеля воздухом калорифер должен быть расположен ниже основания штабеля (см. рис. 12, б). Но и в этих условиях в первую очередь воздух отдает тепло материалу в верхней части штабеля, поэтому в нижней его зоне материал будет иметь в процессе и к концу сушки повышенную влажность.

Рассматривая естественное движение воздуха внутри штабеля, легко установить, что при ребровой укладке материала и вертикальном расположении прокладок (рис. 78, а) воздух

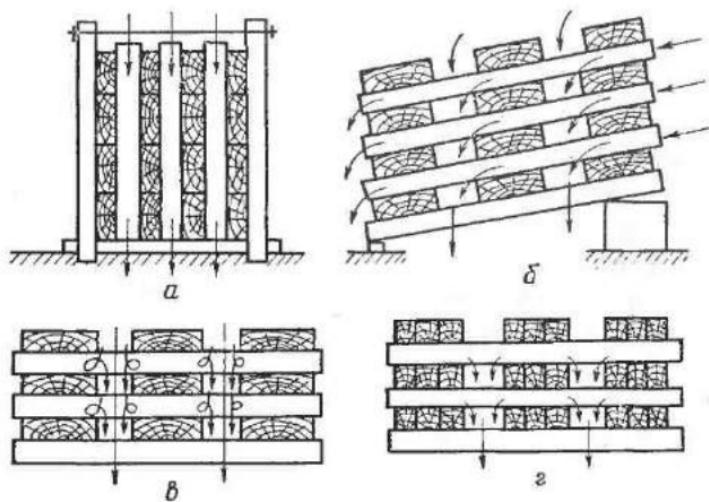


Рис. 78. Свободное движение воздуха по высушиваемому материалу при различной его укладке в штабель:
а — ребровая (вертикальная); б — наклонная; в — горизонтальная;
г — горизонтальная групповая

активно омывает испаряющие поверхности. Однако на практике такую укладку пиломатериалов не применяют, так как доски трудно зажать с боков для предотвращения их коробления в процессе сушки; кроме того, такое штабелирование вообще затруднительно.

Промежуточным является наклонное штабелирование, применяемое иногда в камерах с естественной циркуляцией воздуха (при сушке широких материалов). При такой укладке материала воздух, охлаждаясь, стекает с наклонных пластей досок (рис. 78, б).

На рис. 78, в показана обычная схема омывания воздухом материала в сушильных камерах с естественной циркуляцией воздуха. Для достижения более свободного перемещения внутри штабеля и возможно быстрого удаления увлажненного воздуха необходимо строго соблюдать вертикальное расположение

жение зазоров (шпаций) между кромками соседних по ширине штабеля досок (рис. 78, в, г).

Более интенсивная конвекция воздуха у кромок досок; здесь древесина просыхает лучше, чем в середине ширины доски. При групповой укладке заготовок (рис. 78, г) средние заготовки в группе просыхают медленнее. Несколько устранить этот недостаток в таких камерах помогают толстые прокладки. Ими достигают более свободной циркуляции воздуха по всему объему штабеля. Часто более толстые (или сдвоенные) прокладки применяют в нижней части штабеля для усиления в этой зоне конвективного движения воздуха.

Естественная циркуляция воздуха при индустриальной сушке пиломатериалов — пройденный этап развития сушильной техники, хотя такого типа сушильные установки продолжают эксплуатироваться на многих предприятиях. Они допустимы при строительстве предприятий малой мощности.

45. ПОБУДИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОЗДУХА ПО МАТЕРИАЛУ

При побудительной циркуляции каждая доска в штабеле омывается воздухом по ее пластям в поперечном к длине доски направлении. Для удовлетворения основного требования к качеству сушки — равномерного просыхания древесины во всем объеме штабеля — необходимы равномерное распределение воздуха по его длине и по высоте, а также значительные скорости воздуха по материалу, способствующие достаточно равномерному просыханию древесины по ширине штабеля, т. е. по направлению движения в нем потока воздуха. Рассмотрим основные задачи распределения воздушных потоков в характерных узлах сушильных камер.

Равномерность распределения воздуха по длине сушильной камеры

Один из способов достижения равномерной раздачи воздуха по длине камеры (обычно длиной 14 м) — рассредоточенная установка многих вентиляторов, действующих параллельно. Однако при этом возникают некоторые трудности как конструктивного, так и эксплуатационного характера, хотя этот способ широко применяется. Второй способ заключается в торцовом подводе воздуха и раздаче его в камере по длине с использованием принципа распределительного канала с равномерной раздачей. Рассмотрим эту техническую задачу.

Пусть задана равномерная раздача воздуха из отверстий по длине тупикового (с закрытым торцом) нагнетательного канала постоянного сечения и длиной l . Если число отверстий 12—15, потерями давлений из-за внезапных расширений в данном случае можно пренебречь вследствие практически непре-

рывного (из большого количества отверстий) отбора воздуха по длине канала. Если обозначить через V_1 ($\text{м}^3/\text{с}$) объем воздуха во входном сечении $I-I$ (рис. 79, а), V_2 — объем воздуха в сечении $II-II$ на расстоянии x от сечения $I-I$, v_1 и v_2 ($\text{м}/\text{с}$) — скорости воздуха в этих сечениях, Δ_h — приращение статического давления на участке $I-II$ длиной x , λ — коэффициент трения [см. (204)], то

$$\Delta_h = \frac{\rho(v_1^2 - v_2^2)}{2} - \lambda \frac{x}{d} \cdot \frac{\rho v_1^2}{2}. \quad (207)$$

Первый член этого равенства показывает приращение статического давления в канале из-за уменьшения скорости воз-

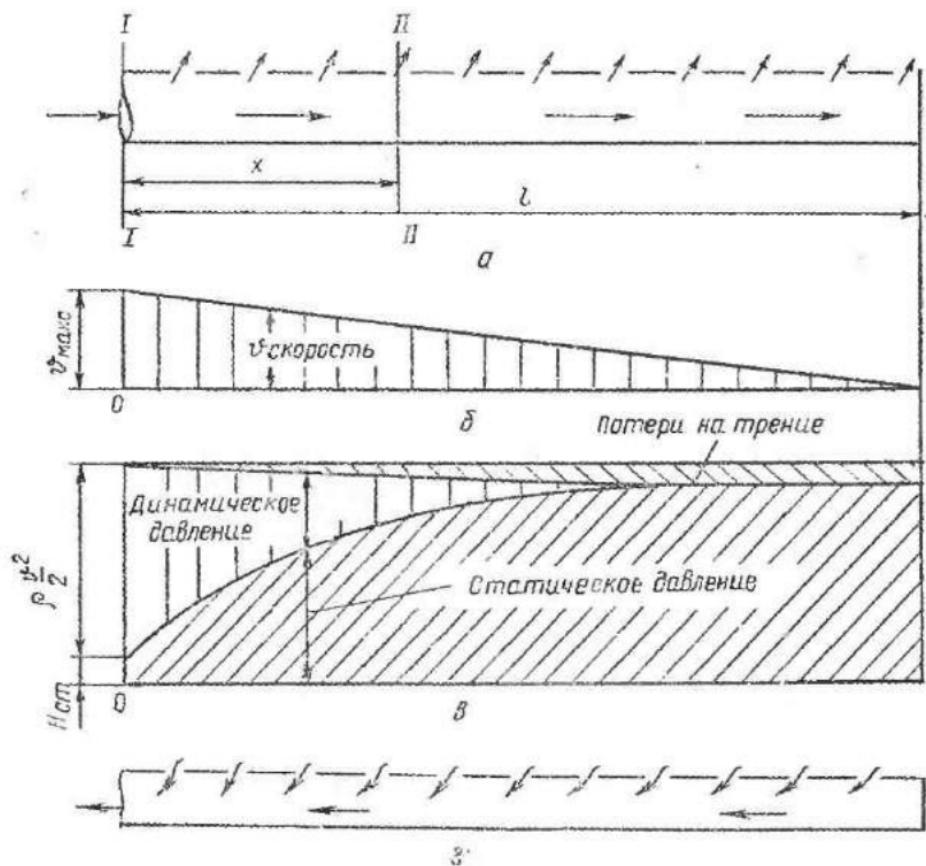


Рис. 79. Распределительный и отборный каналы:

а — схема распределения воздуха, вытекающего из канала; б — эпюра скоростей воздуха; в — эпюра давлений по длине канала; г — отборный канал

духа с v_1 до v_2 , т. е. превращения части динамического давления в статическое; второй член определяет потерю давления на трение в паскалях.

При коротком канале преобладает влияние динамического давления, поэтому скорость выхода воздуха из отверстий

канала постепенно возрастает по направлению к последнему отверстию. У длинного и, тем более, шероховатого канала, наоборот, величина трения немедленно или после некоторого пути превышает приращение динамического давления, вследствие чего скорость выхода воздуха из отверстий постепенно уменьшается.

Имеется другой способ решения поставленной задачи. Из аэродинамики известно, что трение нагнетательного канала постоянного сечения не влияет заметно на выход воздуха из его боковых отверстий даже неодинакового размера и неравномерно расположенных, если сумма сечений этих отверстий не превысит $\frac{1}{3}$ входного сечения канала. Это значит, что воздух выходит практически с одинаковой скоростью из всех отверстий, если эта скорость не менее чем в 3 раза превышает максимальную скорость воздуха в канале, другими словами, если в распределительном канале будет создано давление равное девяти ($v^2=3^2$) динамическим давлениям вступающего в него воздуха. Это условие удобно соблюсти в случае истечения из нагнетательного канала воздуха с большой скоростью при последующем использовании энергии вытекающих струй.

Расчеты показывают, что для достижения равномерного отбора воздуха в тупиковый канал длиной 14 м относительная площадь отверстий на каждый метр длины должна составлять около $1 : \frac{2}{3} : \frac{1}{3}$ соответственно в конце, в средине и в начале канала (рис. 79, г).

Равномерность распределения воздуха по высоте штабеля

Одна из главных задач — равномерное распределение воздуха, подаваемого от вентиляторов в боковые пространства сушильной камеры (рис. 80). Боковые пространства между штабелями и стеной выполняют роль коротких по пути воздуха, но широких по направлению длины (или высоты) камеры каналов, распределительного с одной стороны штабелей и отборного с другой их стороны. Так как в коротком распределительном канале статическое давление увеличивается по пути движения воздуха, справа на рис. 80, а воздух при значительных скоростях устремляется в нижнюю часть, омывая большую нижнюю зону штабеля, а справа на рис. 80, б — вверх, более интенсивно высушивая древесину в верхней зоне.

При увеличении зазора между штабелем и стеной воздух по высоте штабеля распределяется равномернее. Опытом установлено, что этот зазор должен быть не менее половины суммы толщин всех прокладок, уложенных в ряду по всей высоте штабеля. Так, при высоте штабеля 2,6 м и толщине материала и прокладок 25 мм сумма толщин прокладок 1,3 м; следова-

тельно, зазор между штабелем и стеной должен быть 0,65 м. Применение тормозящих устройств (см. рис. 80, а) способствует более равномерному распределению воздуха по высоте штабеля. В случае удачного их использования указанная для высоты штабеля 2,6 м ширина зазора (0,65 м) может быть несколько снижена.

Ту же роль (торможения воздушного потока) выполняют ребристые трубы на стенах сушильной камеры (рис. 80, а, 1), увеличивающие шероховатости распределительного и отборного каналов и, следовательно, полезное их аэродинамическое сопротивление.

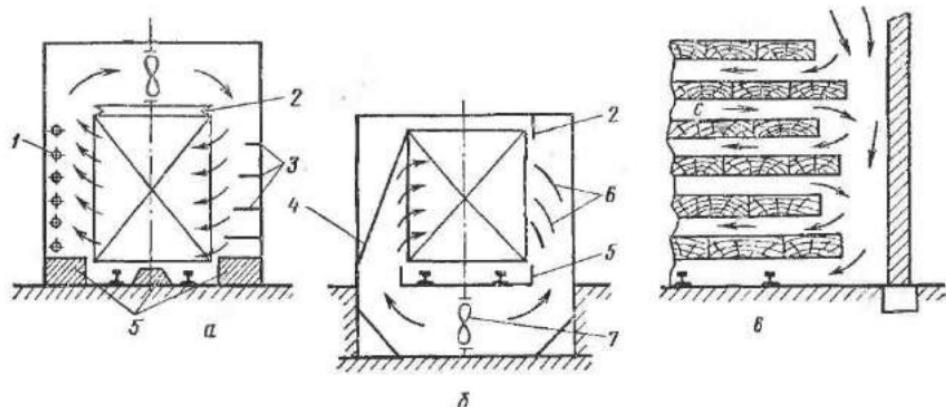


Рис. 80. Методы улучшения распределения воздуха по высоте штабеля:
а — тормозящие поток воздуха устройства; б — распределительные устройства; 1 — ребристая труба; 2 — подвесная штора; 3 — настенные полки; 4 — наклонная стена; 5 — экраны; 6 — направляющие лопатки; 7 — вентилятор; в — влияние выступающих кромок досок на распределение воздуха в штабеле

При неровной боковой поверхности штабеля побудительное движение воздуха между отдельными рядами досок будет неравномерным и даже может быть противоположным общему потоку (рис. 80, в, канал с). Если воздух ударяет о выступающую кромку доски, динамическое давление перед ней частично превращается в статическое, создавая увеличенную скорость воздуха перед этим рядом досок. Следовательно, при указанной схеме поступления воздуха в штабель небрежное выполнение боковой поверхности штабеля приводит к неравномерному омыванию его воздухом и неодинаковой интенсивности просыхания материала.

46. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЖЕКЦИОННОГО ПОБУЖДЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА

Схема действия эжекционной сушильной камеры (рис. 81, а) следующая. Вентилятор 1 забирает из сушильной камеры часть отработанного воздуха, прогоняет его через калорифер 2

и нагнетает в распределительный канал, из которого нагретый воздух вытекает с большой скоростью, через горизонтальный ряд сопел 4. При этом эжектирующая струя подсасывает отработанный (эжектируемый) воздух из зоны 7.

Смесь из нагретого эжектирующего воздуха, вытекающего из сопел, и отработанного эжектируемого, отсасываемого из

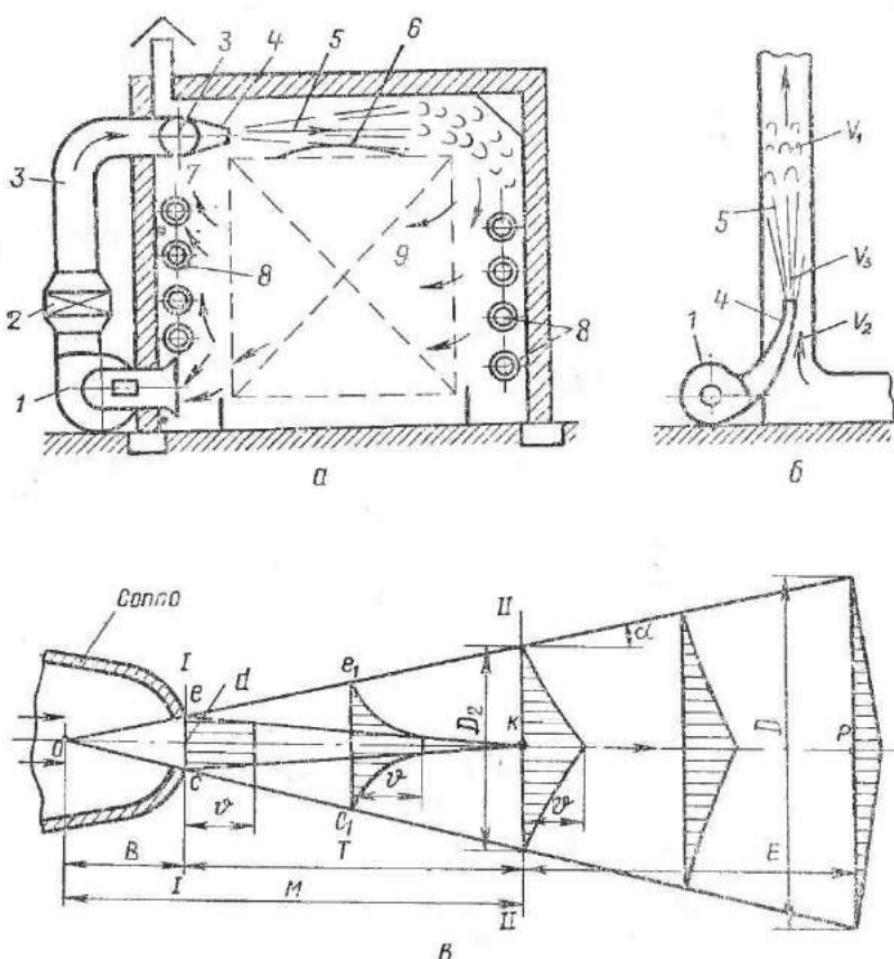


Рис. 81. Схема эжекционной циркуляции воздуха:

а — в сушильной камере; **б** — в дымовой трубе; **1** — вентилятор; **2** — калорифер; **3** — нагнетательный воздуховод; **4** — сопло; **5** — эжектирующая струя; **6** — экран эжекционного узла; **7** — зона подсоса воздуха к соплам; **8** — калорифер настенный; **9** — высушиваемый материал; **в** — схема свободной струи

зоны 7, направляется в штабель и испаряет из материала влагу. После этого часть (20—30%) отработанного воздуха забирается повторно вентилятором, а основное его количество (70—80%) снова подсасывается эжектирующей струей, выте-

кающей из сопел 4. Следовательно, основное количество циркулирующего по материалу воздуха поступает повторно к нему, не проходя через вентилятор и его воздуховоды. Таким образом, производительность вентилятора требуется в 3—5 раз меньшая, чем это необходимо без применения в сушильной камере эжекции; однако давление воздуха из вентилятора должно быть увеличено.

Небольшое количество воздуха (1—2% от циркулирующего) при необходимости удаляется наружу через вытяжную трубу. Часто эту трубу не устраивают из-за избыточности неорганизованного воздухообмена.

Эжекцию применяют также в котельных для создания разрежения в дымоходе за котлом в виде тяги непрямого действия (рис. 81, б); на схеме с предельной четкостью раскрывается принцип эжекционного побуждения циркуляции воздуха (газов). Здесь V_3 — объем воздуха из сопел (эжектирующий), V_2 — объем подсасываемого (эжектируемого) и V_1 — суммарный его объем. Кратность эжекции $m = V_1/V_3$.

Остановимся на свойствах и геометрических соотношениях эжектирующей струи. Эпюры скоростей воздуха v (горизонтально заштрихованы) и форма струи в различных ее сечениях приведены на рис. 81, в.

Полюс струи O является как бы турбулентным ее источником. Он находится внутри сопла на расстоянии B от выходного отверстия. Угол раскрытия струи 2α при плавном поджатии ее перед выходом из сопла $25—28^\circ$. При высоте (или диаметре) выходного отверстия сопла d расстояние $B = 2d$.

Соотношение между скоростями в разных точках струи, как и ее форма, не зависят от начальной ее скорости, т. е. струе свойственна автомодельность. Струя, выходящая из круглого сопла, образует конус с вершиной в точке O , а выходящая из щели, перпендикулярной плоскости чертежа, плоская струя имеет форму треугольной призмы. В треугольнике eck (ядро струи) скорости воздуха v одинаковы, равны начальной. Участок T , равный длине ядра струи, называется начальным, а правее его (E) основным.

Диаметр круглой струи D (или высота плоской струи) в любом ее поперечном сечении равен половине расстояния от этого сечения до полюса: $D = (M+E)/2 = (E+T)/2 + d$. Длина начального участка составляет $T = 4,7d$.

Горизонтальная ось OP струи теряет прямолинейность и изгибается кверху, если плотность эжектирующего воздуха меньше эжектируемого, струя эжектирующего, более плотного (холодного) воздуха отклоняется книзу.

Струи, выходящие из рядом установленных по длине канала параллельно действующих сопел, после соединения образуют общий воздушный поток, а их скорости — среднюю скорость потока.

На рис. 82 изображена схема установки сопел на общем нагнетательном канале и показаны струи, соединяющиеся в общий воздушный поток. Смежные струи должны полностью сомкнуться в пределах камеры смешения эжектора (до сечения $I-I$)

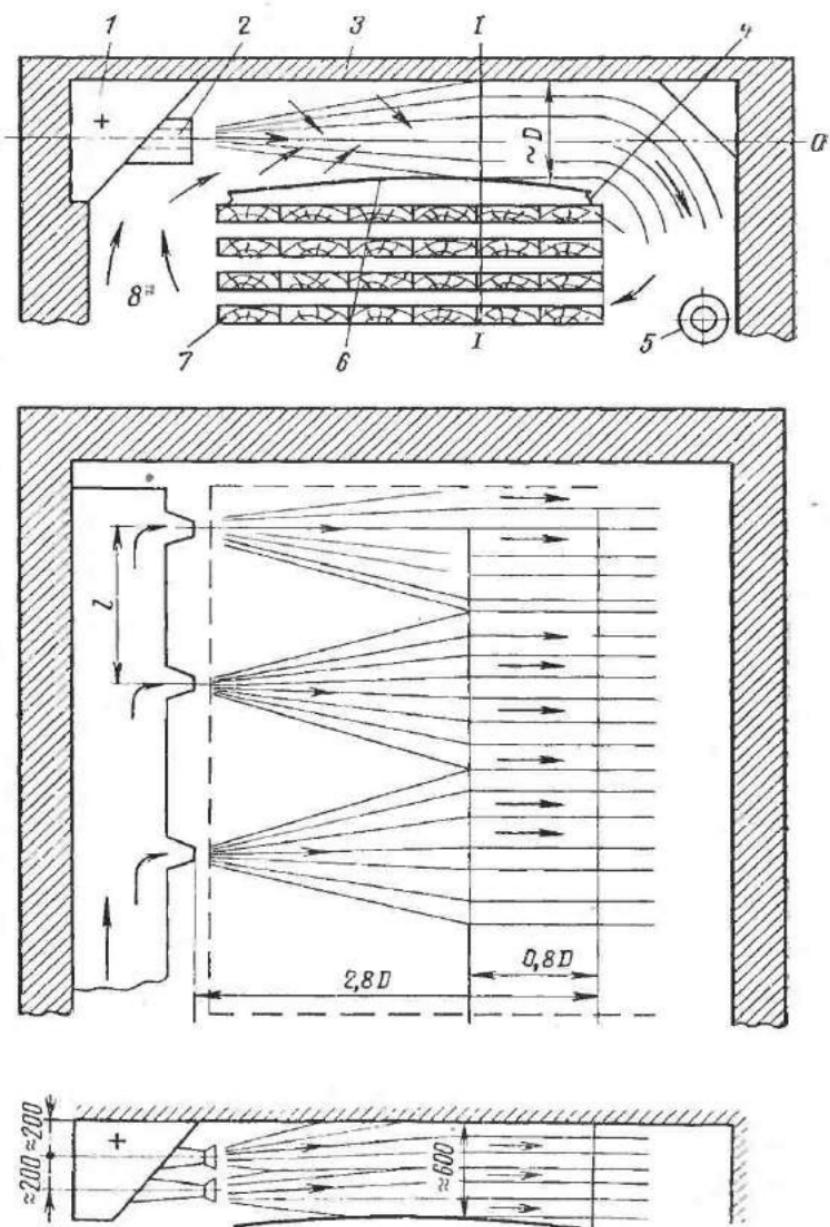


Рис. 82. Сопряжение смежных струй воздуха:

1 — нагнетательный канал; 2 — сопло; 3 — перекрытие сушильной камеры — верхний экран камеры смешения эжектора; 4 — брезентовый экран (надрезанный); 5 — калорифер; 6 — нижний экран камеры смешения эжектора; 7 — высушиваемый материал; 8 — зона подсоса воздуха к соплам

ния I—I); в противном случае в пространствах между несомкнувшимися струями возникнет обратный ток воздуха, снижающий эффект эжекции. Это может произойти, если при коротком смесительном канале будет принято излишнее расстояние между соплами, или ось сопла не совпадает с осью камеры смешения ($O—O$).

Размеры на рис. 82 $0,8D$ и $2,8D$ показаны для конических сопел. Величина D — около 600 мм; шаг сопел l — около 500 мм.

В сушильных установках применяются щелевидные сопла (больший их размер в вертикальной плоскости) с двумя горизонтальными перегородками по их длине. Из таких сопел в поперечном сечении вытекает эллиптическая струя, близкая к прямоугольной. При этом оказалось возможным применение более высокой и одновременно более короткой камеры смешения эжектора, что способствует увеличению предельной мощности потока в сушильной камере. Отношение высоты струи в устье сопла к ее ширине составляет 5—6. По конструкции сопло сужается по ширине (см. рис. 82), плавно поджимая струю с боков.

При условии соблюдения горизонтальности осей рекомендуются к применению двойные (по высоте) конусные сопла диаметром d около 100 мм, как это показано на рис. 82 (внизу). В камере смешения не допускаются выступы (уголки, борты и т. п.).

47. ВЛИЯНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА В КАМЕРНОМ ПРОЦЕССЕ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ПРОСЫХАНИЯ МАТЕРИАЛА

По мере перемещения воздуха внутрь штабеля материала и испарения из него влаги температура воздуха и его психрометрическая разность уменьшаются, что замедляет испарение влаги. В результате интенсивность сушки материала по пути движения воздуха в разных зонах штабеля неодинаковая.

На рис. 83 нанесены кривые сушки материала, находящегося в зоне A вступления воздуха в штабель и зоне B выхода его из штабеля. Материал начал просыхать только с момента, определяемого точкой 3 на верхней кривой сушки. Процесс характеризуется кривой сушки B , которая показывает отставание просыхания материала на величину горизонтального отрезка между кривыми A и B . В начале сушки это отставание равнялось отрезку времени $1—3$, затем $2—4$, а в конце $5—6$. Таким образом, процесс сушки удлиняется и, кроме того, материал просыхает неравномерно из-за разности влажностей древесины, отсчитываемой по ординатам точек 6 и 7. Чем больше скорость воздуха по материалу и короче его путь в штабеле, тем равномернее просыхает древесина. Рис. 83 характеризует камерный и туннельный процессы сушки.

Рассмотрим закономерности просыхания пиломатериалов в штабеле при поперечном омывании его воздухом, применительно к камерному процессу. На рис. 84, а показаны температурные кривые t_1 , t_2 и t_3 воздуха в штабеле по ширине b в различные моменты камерной сушки τ_1 , τ_2 и τ_3 в стадии регулярного режима. Соответствующее изменение влажности материала изображено на рис. 84, б кривыми $w(x, \tau)$ с обратной их кривизной по сравнению с линиями $t(x, \tau)$.

Приняв, что скорость сушки материала по пути движения воздуха пропорциональна величине избыточной влажности древесины $w - w_p$ и в узком диапазоне скоростей воздуха обратно

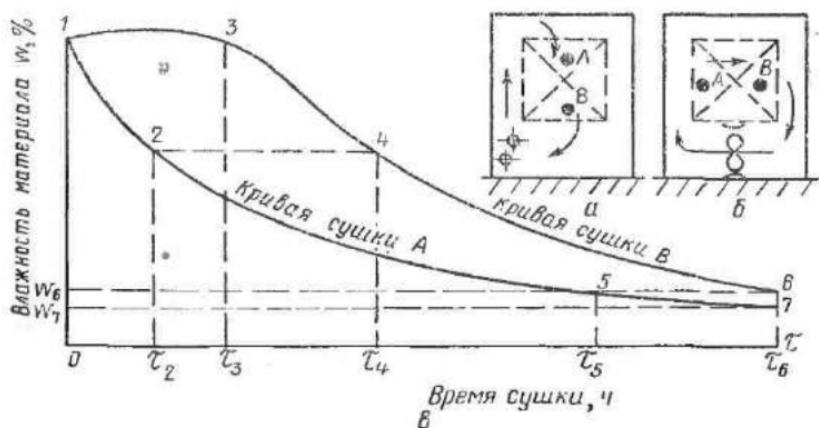


Рис. 83. Неравномерность просыхания материала при односторонней циркуляции воздуха в штабеле:

a — при вертикальном движении воздуха; *б* — при горизонтальном его движении; *в* — кривые сушки *A* и *B* материала в точках *A* и *B* штабеля

пропорциональна параметру, показывающему количество воздуха, подаваемого к материалу, т. е. подводимого тепла и уносимой влаги, получим:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{a}{v} (w_m - w + 1), \quad (208)$$

где x — расстояние от точки вступления воздуха в штабель; a — коэффициент; w_m — максимальная влажность древесины у места выхода воздуха из штабеля (рис. 84, *в*); w — текущая влажность древесины по ширине штабеля соответственно координате x . При $w_m - w = 0$ будет $\frac{dw}{dx} = \frac{a}{v}$. Разделив переменные, получим интегральное выражение

$$\int dx = \frac{v}{a} \int \frac{dw}{w_m - w + 1}. \quad (209)$$

В результате интегрирования

$$x = \frac{x}{a} \ln (w_m - w + 1) + C, \quad (210)$$

где постоянная интегрирования C определится из условия $x=b$, когда $w=w_m$, поэтому $C=0$, т. е. ширине штабеля b .

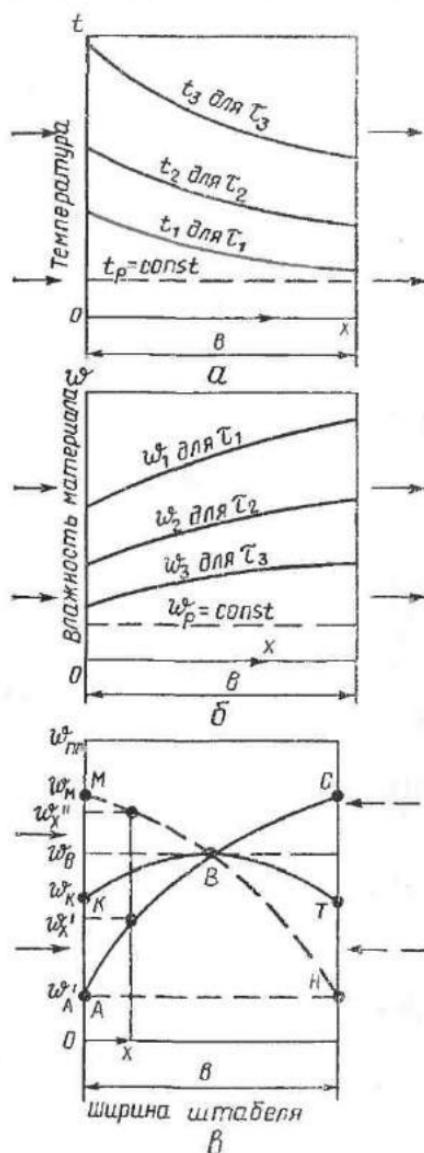
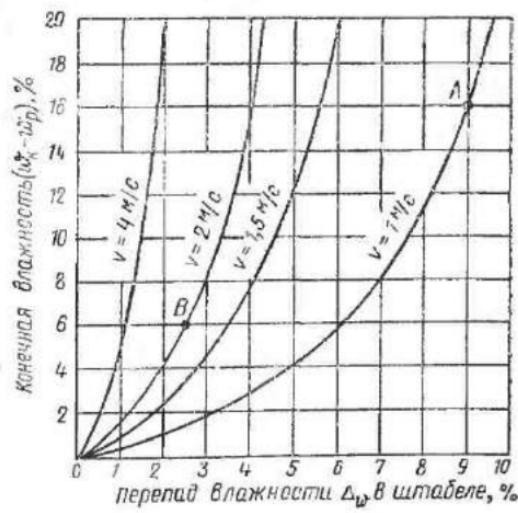


Рис. 84. Изменение по ширине штабеля материала:

a — температура воздуха в разные моменты 1, 2, 3 сушки; *б* — локальной влажности древесины штабеле в те же моменты сушки при односторонней циркуляции; *в* — влажность древесины при реверсивной циркуляции (кривая KBT)

Рис. 85. Перепады влажности Δ_w материала в штабеле при одностороннем движении воздуха с различной скоростью



Таким образом, для закономерной неравномерности влажности древесины получим

$$w_m - w = \Delta_w = e^{\frac{a}{\sigma}(b-x)} + 1. \quad (211)$$

На рис. 85 приведена диаграмма, построенная по (211) при расчетном для каждого сортимента количестве воздуха, когда $w_h=60\%$ и $v=1,8$ м. Диаграмма показывает зависимость среднего перепада влажности древесины по ширине штабеля в функции от скорости воздуха по материалу и конечной его влажности за вычетом равновесной. Например, при скорости воздуха в штабеле $v=1$ м/с и конечной влажности древесины $w_k-w_p=20-4=16\%$ получим $\Delta_w=9\%$ (точка A), а при $v=2$ м/с и $w_k-w_p=8-2=6\%$ определим $\Delta_w=2,5\%$ (точка B).

Для реверсивной циркуляции перепад влажности в точках В и К (см. рис. 84, б)

$$\Delta_{w_{\text{рев}}} = w_B - w_K = \frac{e^{\frac{ab}{v}} - e^{\frac{ab}{2v}} + \frac{1}{2}}{2}. \quad (212)$$

Это уравнение кривой гиперболического косинуса малой кривизны близко к уравнению параболической кривой, поэтому в стадии регулярного режима кривую КВТ можно принимать за квадратическую параболу. При этом легко установить величину средней влажности древесины в штабеле — горизонталь средней влажности проходит через ординату, отстоящую на одну треть перепада влажности ($w_B - w_K$) ниже точки В. Расчет по выявлению характерных влажностей в штабеле аналогичен расчету влажности по толщине доски. Величина перепада влажности (в средине и у боков штабеля) приближенно пропорциональна квадрату его ширины.

Значение параметра *скорости воздуха* применительно к лесосушильным камерам в основном не в интенсификации процесса сушки единичных досок, поскольку период постоянной скорости сушки для пиломатериалов практически отсутствует, а при удалении связанный влаги влияние скорости воздуха на интенсивность процесса в среднем невелико. Главным образом этот параметр влияет на сокращение продолжительности сушки за счет одновременного просыхания всей партии материала (уменьшения отрезков 2—4 и 5—6, см. рис. 83), а также на улучшение качества (равномерности) сушки пиломатериалов.

48. ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ — ВОЗДУХА И ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА В ТУННЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Влияние недостатка и избытка воздуха на кинетику процесса сушки

При недостаточном количестве подаваемого воздуха замедляется и даже прекращается испарение из материала влаги на загрузочной стороне туннеля (слева на рис. 86, а, б). Часть ав туннеля выключается из процесса сушки. Эффектив-

ная его длина bc (рис. 86, в) будет соответствовать количеству подаваемого в него воздуха.

При избытке воздуха подлежащая удалению из штабелей материала 1—5 (рис. 86, а) влага испаряется в основном на загрузочной стороне туннеля. Сушильный агент приходит сюда с высокой температурой и большой психрометрической разностью, интенсивно испаряет влагу из только что загруженного

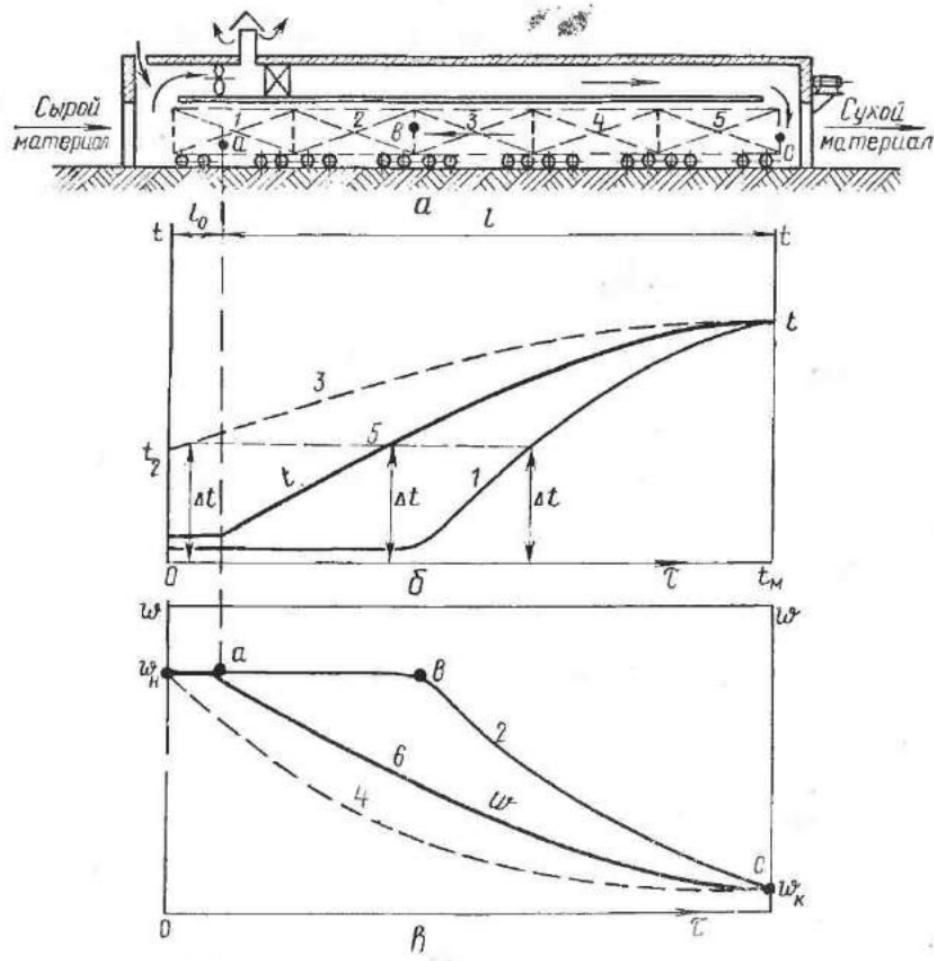


Рис. 86. Зависимость процесса сушки в противоточном туннеле от количества подаваемого воздуха:

а — схема сушильного туннеля; б — кривые температур; в — кривые сушки; 1, 2 — кривые при недостатке; 3, 4 — избыток; 5, 6 — нормальное количество воздуха

го материала с опасностью его растрескивания. Длина туннеля при этом недостаточна для данного материала и режимных условий сушки. Таким образом, недостаточное количество воздуха приводит к уменьшению производительности туннеля, а избыточное — к нарушению режимных условий сушки мате-

риала, как это показано сплошными 1, 2 и пунктирными 3 и 4 линиями на рис. 86, б, в. Температурные кривые 1, 5, 3 — это зеркально отраженные кривые сушки (без учета теплопотерь).

Из рассмотренного следует, что реально используемая длина имеющихся на предприятии противоточных туннелей диктуется количеством (скоростью) подаваемого к материалу воздуха. При расчетах получим, что при высушивании сосновых досок толщиной 35 мм длина пути l по ним воздуха в противоточном туннеле должна примерно соответствовать пятишестикратной его скорости v . Это значит, что воздух должен проходить по пластям материала всех штабелей за 5—6 с. С учетом влияния толщины материала T (мм), определим эффективную длину туннеля:

$$l = av\sqrt{T}, \quad (213)$$

где a — коэффициент, зависящий от ряда факторов и, в основном, от режимных условий сушки (для нормальных режимов близок к единице).

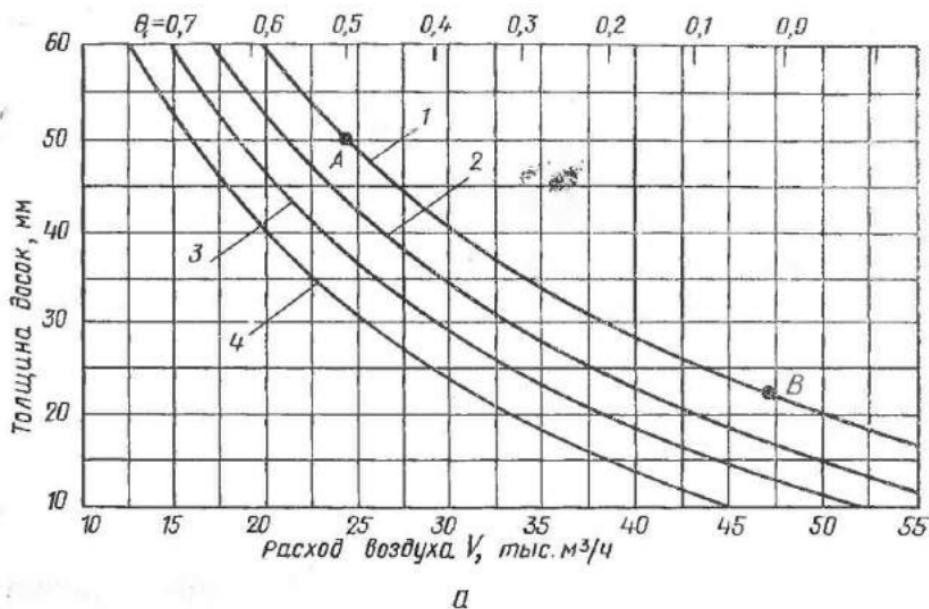
Например, при $T=25$ мм и $v=2$ м/с длина пути воздуха по материалу должна быть $l=2\sqrt{25}=10$ м.

Это уравнение позволяет устанавливать правильность соотношений между длиной пути воздуха, скоростью его циркуляции и толщиной высушиваемых пиломатериалов в эксплуатируемых или вновь проектируемых противоточных туннелях.

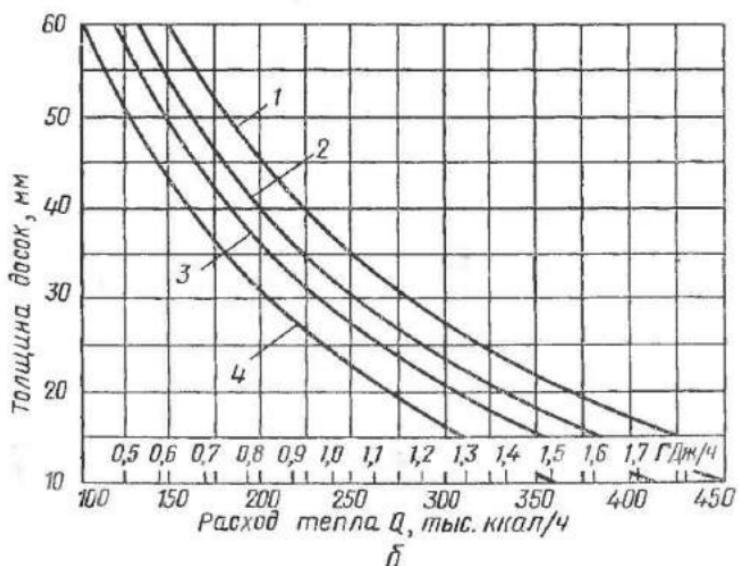
Влияние толщины материала на часовую потребность в воздухе и тепле

В одном и том же туннеле по мере уменьшения толщины материала возрастает интенсивность сушки, но одновременно снижается вместимость штабеля; при этом часовой расход воздуха и тепла повышается. Это значит, что аэродинамическое и тепловое напряжение и одновременно форсировка камер по влаге увеличиваются.

Диаграмма зависимости расхода и тепла от толщины соснового материала в пятиштабельных противоточных туннелях с коэффициентом укладки материала 0,9 по ширине штабеля при обычной влажности и нормальных режимах сушки представлена на рис. 87. Кривые имеют гиперболическую форму, т. е. зависимость $T(V, l)$ обратная. На диаграммах дано по четыре кривых соответственно сезонным условиям работы сушильной установки. При замене равномерных шкал на осях абсцисс кривые характеризуют любые туннели. Следовательно, необходимо регулировать количество сушильного агента в противоточных лесосушильных туннелях при разной толщине и характеристике высушиваемого материала, изменяющихся условиях процесса сушки, а также сезонных наружных и режимных температурных отклонениях.



а



б

Рис. 87. Диаграммы потребного количества:

а — воздуха; **б** — тепла; 1 — кривые расхода воздуха и тепла в крайнем туннеле зимой; 2 — то же в среднем туннеле зимой; 3 — то же в среднем туннеле летом; 4 — то же только на испарение влаги

Применение прерывистой циркуляции воздуха

В параграфе 39 излагались особенности, характеристика и преимущества прерывистой циркуляции воздуха, в том числе применительно к туннельному процессу. Более обстоятельный анализ по оптимизации использования такого процесса удобно проводить, применив диаграмму на рис. 87, а. Нижняя шкала диаграммы для различных систем туннелей отклоняется по численным значениям, однако закономерности, даваемые диаграммой, будут аналогичными.

Выберем исходную точку B расхода воздуха применительно к сушке тонких материалов (например, $T=22$ м) в зимнее время, когда вентиляторы должны работать непрерывно, т. е. относительное время пауз Θ равно нулю. Отложим это значение $(0, 0)$ вверху диаграммы. Для половинного расхода воздуха (точка A) отложим значение $\Theta=0,5$; это значит, что вентилятор подаст требуемое количество воздуха для новых условий ($T=50$ м) за половинное время его работы. Построим шкалу значений Θ вверху диаграммы.

Из диаграммы с верхней шкалой следует, что для любой толщины материала при различных внешних влияниях легко установить соответствующее значение Θ для реализации режимов сушки с прерывистой циркуляцией воздуха в различных производственных условиях. Существенно, что на диаграмме отображается взаимозависимость T , V , Θ как между собой, так и в функции от внешних (теплопотери) воздействий.

Зависимость неравномерности сушки материала от числа штабелей в туннеле и количества воздуха

Из анализа конечного участка кривой сушки (см. рис. 86, в, б) при туннельном процессе следует, что в переднем конце выгруженного из туннеля штабеля пиломатериалов влажность w_k древесины будет ниже, чем w в заднем (см. также ординаты точек 5 и 7 на рис. 83, в). Чем больше одновременно высушивается штабелей в туннеле, т. е. чем на большее число одинаковых в горизонтальной проекции участков будет разделена кривая сушки, тем меньше закономерный перепад влажности древесины в заднем и переднем концах выгруженных штабелей; при малом числе высушиваемых штабелей (примерно три) перепад значителен (например, $w-w_k$ на рис. 86, в, 2). Рассматриваемая зависимость выражается уравнением [10]:

$$w/w_k = (w_n/w_k)^{1/n}, \quad (214)$$

где n — число штабелей.

Если отношение $(w-w_k)/w_k = \Delta_w/w_k = K_n$, (215)
назвать коэффициентом закономерной неравномерности сушки,

то

$$K_n = \Delta_w / w_k = (w_n / w_k)^{1/n} - 1. \quad (216)$$

Чем меньше отношение начальной влажности w_n к конечной w_k , тем меньше K_n , т. е. равномернее просыхает материал.

Зависимость по (216) представлена графически на рис. 88. При $w_n/w_k=10$ и $n=5$ (точка A) получим $K_n=0,58$, т. е. в случае конечной влажности древесины в переднем конце штабеля

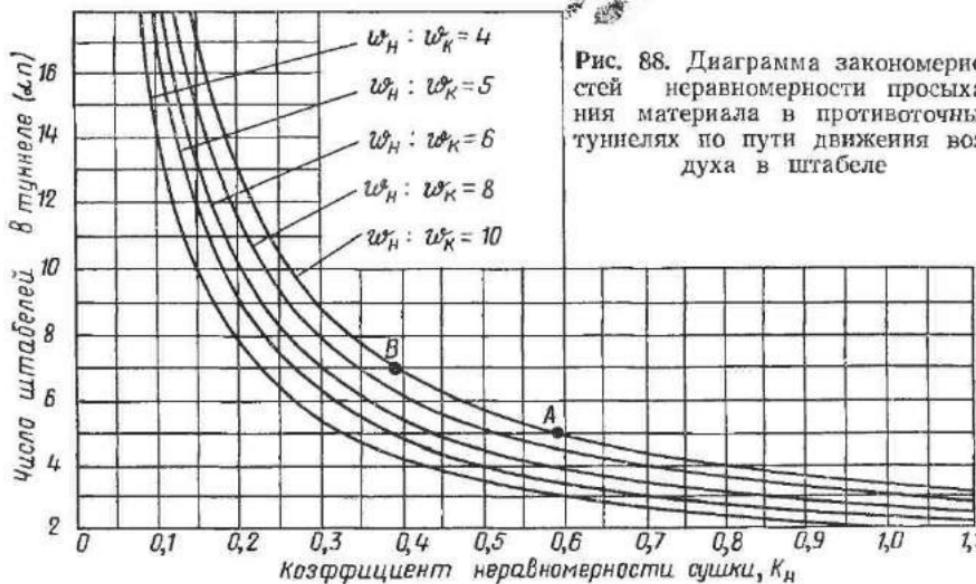


Рис. 88. Диаграмма закономерностей неравномерности просыхания материала в противоточных туннелях по пути движения воздуха в штабеле

$w_k=10\%$ перепад влажности по длине штабеля [см. (215)] $\Delta_w=10 \cdot 0,58=5,8\%$. Следовательно, влажность древесины в заднем конце штабеля $15,8\%$. Если $n=7$, то $K_n=0,39$ и соответствующая влажность древесины $w=13,9\%$ (точка B); если из-за недостатка воздуха $n=3$, то $K_n=0,85$ и $w=18,5\%$, т. е. перепад влажности по длине штабеля будет очень большим $18,5-10=8,5\%$.

Избыток воздуха улучшает равномерность просыхания материала и одновременно повышает производительность туннеля. Поэтому, если материал не растрескивается, желательно увеличить количество воздуха до значения V_1 по сравнению с потребным V . Отношение V_1/V назовем коэффициентом избытка воздуха α в сушильных туннелях.

Заменив количество n штабелей в туннеле на большее n_1 при более равномерной сушке (см. рис. 88) и имея в виду, что $\alpha=n_1/n=V_1/V$, получим

$$K_n = [(w_n / w_k)^{1/\alpha n}] - 1 = [(w_n / w_k)^{V_1/V V_1}] - 1. \quad (217)$$

Из (217) следует, что при $\alpha < 2$ коэффициент неравномерности сушки уменьшается почти пропорционально увеличе-

нию α , т. е. с повышением избытка воздуха соответственно снижается неравномерность просыхания древесины.

Из-за неравномерности начальной влажности и неодинаковых свойств древесины в пределах породы и даже ствола фактический перепад влажности по длине штабелей можно получить замером больше расчетного (закономерного). Здесь не рассмотрен также перепад влажности по толщине материала.

Метод расчета закономерной неравномерности просыхания материала можно использовать при проектировании и эксплуатации сушильных туннелей. Учитывают различные производственные требования к точности механической обработки древесины и, соответственно, к качеству (равномерности) сушки пиломатериалов в зависимости от вида и качества изготавляемой продукции.

ГЛАВА 8. ТИПЫ И КОНСТРУКЦИИ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

49. ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Основные требования

К древесине как материалу, прошедшему техническую операцию сушки, предъявляют два основных требования — достижение высокой точности деталей с целью их взаимозаменяемости при изготовлении изделий и возможно более длительного срока службы при последующем их использовании. Эти требования должны удовлетворяться конструкцией и работой сушильных установок. В связи с этим для правильного выбора типа сушильной установки и эффективной ее эксплуатации можно сформулировать требования к ней как к сооружению и к производственному цеху.

При назначении сушильной установки для качественного высушивания только одной заготовки (доски) к первой предъявлялось бы только технологическое требование поддержания заданной температуры и психрометрической разности воздуха, регулируемых во времени в необходимом диапазоне. Однако при одновременном высушивании большого количества однородных пиломатериалов необходимо интенсивное и в то же время *равномерно распределенное движение воздушного потока* как сушильного агента во всем объеме штабеля. Эти требования основные.

К сушильной установке, как к любому агрегату, предъявляется также ряд технико-экономических требований. Основные из них: минимальная стоимость устройства; минимальные эксплуатационные расходы на просушку пиломатериалов; воз-

можно меньшие расходы металла и дефицитных материалов на его сооружение.

К этому следует добавить производственные требования: материал должен быть заданного качества сушки; установка должна занимать по возможности небольшую площадь, не зависеть при строительстве и эксплуатации от уровня грунтовых вод, быть пожаробезопасной, удобной и несложной в обслуживании.

Каждое из этих требований приобретает большее или меньшее значение в зависимости от местных и производственных условий. Так, для малой полукустарной установки существенное значение имеет простота конструкции и обслуживания; для сушки больших количеств хвойных пиломатериалов, когда приходится оперировать со значительными объемами древесины и испарять много влаги, особую роль приобретают эксплуатационные расходы, связанные с укладкой и транспортировкой материала, а также тепловой КПД установки. При высушивании разнообразных сортиментов высококачественного назначения ведущие требования — маневренность в работе сушильных камер и получение качественно высушенного материала. Чем крупнее сушильный цех и выше требования к качеству сушки материала, тем он должен быть технически совершеннее по выполнению и более механизированным в эксплуатации.

Принципы действия сушильных установок

За исключением подсушки специальных сортиментов (шпал, столбов в пропиточных цилиндрах при консервировании), во всех случаях древесину высушивают при атмосферном давлении. Многочисленные попытки высушивать пиломатериалы при давлении ниже атмосферного (в вакууме) не дали положительных результатов и не получили промышленного распространения. Возможно высушивание пиломатериалов в условиях избыточного давления по сравнению с атмосферным — в среде перегретого пара при $p_{\text{п}} > 0,1 \text{ МПа}$ ($> 1 \text{ кгс}/\text{см}^2$ или 1 ат), когда процесс сушки резко сокращается. Однако в этих условиях значительно снижается прочность древесины.

Промышленное высушивание пиломатериалов выполняют в газообразной среде с подводом тепла и удалением выделившейся из материала влаги конвективным методом. В качестве сушильного агента (рабочего вещества) используют нагретый воздух, продукты сгорания твердого, жидкого или газообразного топлива, а также иногда перегретый пар атмосферного давления.

Все современные сушильные установки для пиломатериалов — рециркуляционные. Построение рециркуляционного процесса сушки нагретым воздухом показано на рис. 80, а, продуктами сгорания — на рис. 18. Лишь при высушивании древесных

частич в производстве древесностружечных плит применяют процессы и установки также и с однократной циркуляцией продуктов сгорания.

Классификация сушильных установок

К существенным признакам классификации относятся принцип действия, способ передачи теплоты от его источника к высушиваемому материалу и схема движения сушильного агента в сушильной установке и по материалу.

По принципу действия сушильные установки могут быть *периодического* или *непрерывного* действия. В первых осущест-



Рис. 89. Классификация лесосушильных установок:

а — тип установок; *б* — метод нагревания сушильного агента; *в* — применяемый теплоноситель; *г* — метод циркуляции сушильного агента по материалу; *д* — метод укладки материала в штабеля и загрузки штабелей

вляется *камерный* процесс с одновременным высушиванием, а затем выгрузкой всей партии сухих пиломатериалов, а во вторых — *туннельный*, когда влажный материал отдельными штабелями постепенно загружается в один конец сушильного туннеля, а сухой — выгружается из другого конца. Таким образом, туннель все время загружен материалом и работает непрерывно.

По способу передачи теплоты от теплоносителя к материалу различают камеры и тунNELи *калориферные* и *бескалориферные* (рис. 89). В *калориферных* установках теплота, необходи-

мая для испарения влаги из материала, передается через стенку (например, металлические трубы, стенки борова) и нагревает находящийся с другой стороны стенки воздух. В качестве теплоносителя применяют пар, поступающий в калориферы (паровые камеры и туннели) и раскаленные продукты сгорания, проходящие внутри боровов (боровые камеры). В беска-
лориферных установках горячие продукты сгорания, поступающие из топки, смешиваясь с отработанными газами, омывают непосредственно высушиваемый материал (см. рис. 18). Продукты сгорания получают обычно в результате сжигания дре-
весного топлива или природного газа.

По характеру движения сушильного агента в штабеле ма-
териала установки могут быть с *естественной* циркуляцией, вследствие изменения плотности воздуха во время испарения влаги (пиломатериал в таких установках укладывают на прокладках со шпациями) или с *побудительной* циркуляцией, осуществляющей вентиляторами (пиломатериал укладывают в штабеле на прокладках плотными горизонтальными рядами).

Движение сушильного агента по материалу, периодически изменяющееся при сушке на противоположное, называется *реверсивным*; при расчетной его скорости по материалу более 3 м/с циркуляция называется *скоростной*.

По производительности различают сушильные установки *малой, небольшой, средней и значительной* мощности, с при-
мерным объемом сушки в условном материале соответственно до 1,0, 1—5, 5—25, 25—125 и крупные — более 125 тыс. м³/год.

Следует четко различать многократную циркуляцию возду-
ха по материалу и воздухообмен (вентиляцию). Многократная (>50 раз) циркуляция происходит по замкнутому пути: нагрев воздуха — испарение влаги — нагрев воздуха и т. д. Воздухо-
обменом называется добавка в камеру или туннель к цирку-
лирующему воздуху 1—3% наружного воздуха и выброс влаж-
ного. Часто в организованном воздухообмене нет надобности из-за обычного излишка неорганизованного воздухообмена.

При рассмотрении сушильных установок основное внима-
ние будет уделено циркуляции воздуха по материалу. В при-
водимых далее схемах воспроизведены основные типы устано-
вок, используемых в промышленности, или перспективных.

50. ТИПОРАЗМЕРЫ ШТАБЕЛЕЙ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Вследствие значительной продолжительности сушки пило-
материалов (1—30 сут.) конвейерный метод их раздельного высушивания затруднителен. Применяют штабельный метод загрузки материала в сушильные установки. Штабель формируют из досок на прокладках толщиной 25 мм из нескольких десятков горизонтальных (один над другим) рядов досок (см. рис. 80). В нормальном штабеле содержится 10—20 т

древесины. Он базируется обычно на низких тележках (загрузочных треках) и перемещается по рельсовым путям сушильного цеха.

С учетом осуществления оптимального технологического процесса сушки укладка пиломатериалов в объеме штабеля преследует цели: а) создать связанную прокладками компактную для перемещения массу древесины; б) образовать (также прокладками) каналы между горизонтальными рядами досок для подвода внутрь штабеля тепла с нагретым воздухом и удаления из него влаги в виде пара; в) надежно зажать пиломатериалы в плоском состоянии посредством вышележащей массы древесины между прокладками для предотвращения ее коробления при сушке. Этого достигают технически правильным формированием штабеля при интенсивном продувании его воздухом во время сушки.

В СССР типовые размеры штабеля шириной 1,8 м и высотой 2,6 м приняты исходя из удобства ручной укладки досок. Длина штабеля (6,6 м) установлена с учетом максимальной длины досок по ГОСТ 8486—66. С применением механизации погрузочных работ отпада необходимость в лимитировании высоты штабеля. Однако при очень высоком штабеле сминаются деревянные прокладки и сами доски в местах сжатия их прокладками в нижней части штабеля. Практически установлена возможность использования при камерной и туннельной сушке пиломатериалов штабелей высотой до 5,5 м, уложенных на девяти и более прокладках. Разработаны туннели СМ-4К для штабелей высотой 5 м.

Ширина штабеля предопределяется равномерностью просыпания материала по пути движения воздуха вдоль прокладок, удобством раскладки досок, ограниченной длиной прокладок и оптимальной вместимостью штабелей по производственным соображениям. В странах Западной Европы применяют штабеля шириной около 1,35 м, в США и Канаде — 2,7 м, а в Скандинавских странах, как и в СССР, — 1,8 м.

Ввиду большого многообразия производственных условий, предопределяющих различные требования к сушильному производству, желательно установить несколько оптимальных вариантов сечений штабелей пиломатериалов.

В качестве базовой величины следует принять существующий штабель 1,8×2,6 м. При иной ширине и высоте штабеля желательно, чтобы он был кратным ширине и высоте пакетов досок. Принимая знаменатель прогрессии равным $\sqrt{2}$ (ГОСТ 8032—56 на предпочтительные числа, ряд R40), для ширины штабелей получим параметры, приведенные в табл. 15.

Существенно, что почти во всех вариантах камер такой ширины возможно устройство их перекрытий с применением железобетонных плит стандартной длины (3, 6, 9 м). В последней колонке табл. 15 предусматривается расположение штабе-

15. Параметры штабелей и камер

Наименование параметра	Число пакетов					
	0,5	0,75	1	1,5	2	3
Ширина штабелей b , м	0,65	0,9	1,35	1,8	2,8	3,6
Ширина дверного проема, м	0,75	1,0	1,5	2,0	3,0	2,0×2
Ширина камеры внутри, м	1,4	1,75	2,5	3,1	4,1	5,6
Ширина камеры между продольными осями кирпичных стен, м	—	2,0	3,0	3,5	4,5	6,0

лей на двух рельсовых путях, желательно с промежуточным подогревом воздуха.

Высота штабеля будет кратной высоте пакета 1,3 м с добавкой 0,1 м на промежуточный брускок. Тогда для высоты штабелей выявится ряд:

Число пакетов, шт.	1	1,5	2	3	4
Высота штабеля, м	1,3	1,9	2,7	4,1	5,5
Высота дверного проема и камеры H , м	1,6	2,2	3,0	4,4	5,8

Штабеля небольших размеров предназначены для очень малых сушильных установок, а больших — для крупных.

Если габаритный объем штабеля (м^3) умножить на 32, получим ориентировочную годовую производительность штабеле-места в условном материале при скоростной циркуляции воздуха (3 м/с); в случае естественной циркуляции воздуха производительность в 2 раза ниже. Например, для существующего типового размера штабеля $1,8 \times 2,6 \times 6,5 = 30,4 \text{ м}^3$ годовая производительность штабеле-места при высушивании сосновых досок толщиной 50 мм равна $30,4 \times 32 \approx 1000 \text{ м}^3/\text{год}$.

51. ЛЕСОСУШИЛЬНЫЕ КАМЕРЫ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ВОЗДУХА (МАЛОЙ МОЩНОСТИ)

Камеры типа «Грум»

Классическим примером простой по устройству и в эксплуатации считается камера системы профессора В. Е. Грум-Гржимайло (рис. 90), называемая камерой «Грум». Калорифер ее состоит из питаемых паром ребристых труб, расположенных группами в виде наклонных рядов в подвальной части камеры с боков штабеля высушиваемого материала. Воздух, соприка-

сяясь с калорифером, нагревается, поднимается кверху, поступает в штабель, охлаждается и опускается. Этот цикл беспрерывно повторяется. Примерно сотую часть вышедшего из штабеля отработанного воздуха при необходимости удаляют через вытяжную трубу. Из-за неизменного по направлению и слабого движения воздуха в штабеле материал в верхней его части просыхает значительно раньше, чем в нижней; наибольшая конечная влажность высушенной древесины наблюдается в сре-

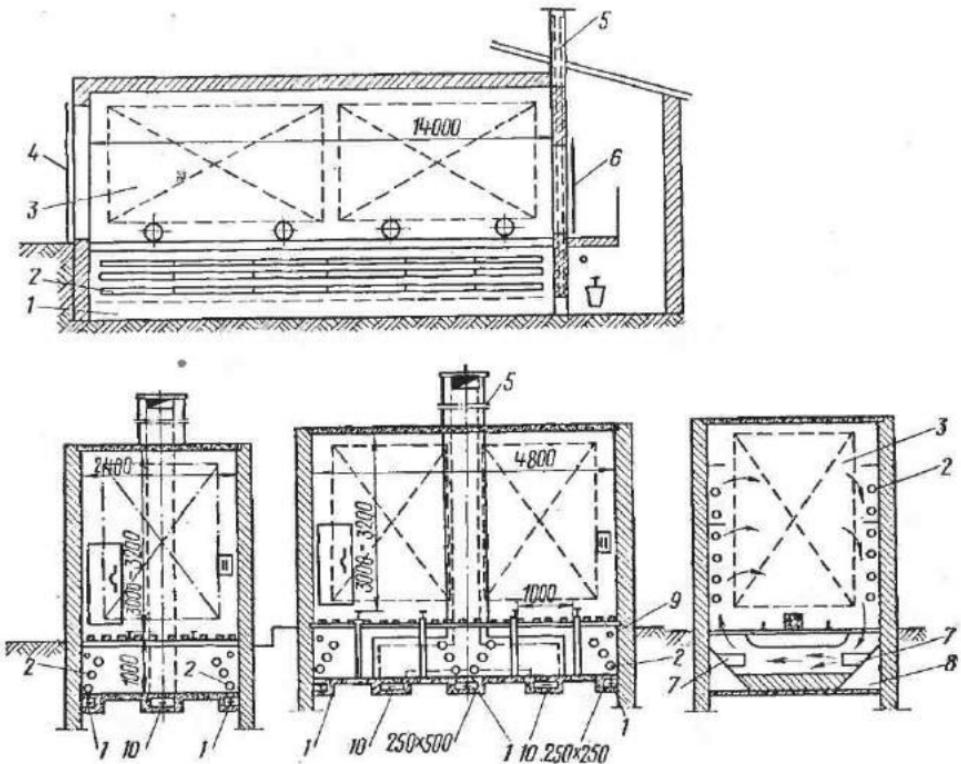


Рис. 90. Лесосушильная камера «Гром»:

1 — приточные каналы; 2 — калориферы; 3 — высушиваемый материал; 4 — дверь; 5 — вытяжная труба; 6 — контрольная дверка; 7 — решетка; 8 — нагнетательный канал; 9 — увлажняющая труба; 10 — вытяжные каналы

дине нижней трети штабеля. Качество сушки материала низкое, так же как и производительность камер. Положительные особенности этих камер — простота устройства и обслуживания, а также отсутствие потребности в электроэнергии.

Камеры применяют трех типоразмеров: на один штабель (с внутренними размерами в плане $7 \times 2,4$ м), на два штабеля ($14 \times 2,4$ м) и на четыре штабеля ($14 \times 4,7$ м).

Существует ряд модификаций камер с естественной циркуляцией воздуха при более равномерном размещении ребристых труб в подвальной части. Им свойственны отмеченные недо-

стаки камер «Грум». Кроме того, в них часто устраивают чрезмерно большие воздухообменные отверстия и трубы, резко ухудшающие работу камер.

Для частичного устранения недостатков таких камер рекомендуется нагревательные трубы располагать во всех случаях ниже основания штабеля и монтировать их так, чтобы они равномерно отдавали тепло по длине и ширине камеры. Следует устанавливать хорошо действующие водоотводчики с контрольными трубками. При устройстве решетчатого пола площадь «живого» сечения отверстий должна быть не менее половины общей площади пола. Все отверстия и неплотности в ограждениях (стенах, дверях, перекрытиях), через которые происходит воздухообмен, должны быть устранины. При укладке пиломатериалов особенно строгие требования предъявляют к точности вертикальности рядов шпаций. Однако доски желательно укладывать без шпаций, сплачивая кромками в трех верхних рядах, и одновременно размещать более разреженно в нижней части. Высоту штабеля в таких камерах следует снизить, очень широкие доски укладывать наклонно (см. рис. 78, б). Это относится и к камерам со слабой побудительной циркуляцией воздуха, когда материал недосыхает в нижней и пересыхает в верхней части штабеля.

Кардинальное решение — это модернизация достаточно больших по размерам камер с естественной циркуляцией на эжекционно-реверсивные. Одна из рекомендуемых камер схематично показана внизу справа на рис. 90. В однопутных камерах применяют щелевые, а в двухпутных — конические сопла. При этом дверной проем и штабеля повышают до перекрытия камеры. К новому устройству камеры этого типа не рекомендуются.

Малые камеры с естественной циркуляцией воздуха

Во многих производственных условиях (совхозах, колхозах, строительных организациях, при ремонте жилищ, мебели и т. п.) возникает необходимость в высушивании небольших количеств древесины, различных сортиментов — менее 1 тыс. и даже часто менее $100 \text{ м}^3/\text{год}$. В этих условиях затруднительно осуществлять квалифицированное обслуживание сушильной техники; камеры должны быть по возможности простыми как по устройству, так и в эксплуатации, а также надежными в работе. В таких производствах возможно применение небольших по размерам и простых по системе камер с естественной циркуляцией воздуха (рис. 91). Ширина штабелей в них 0,65, 0,9 и 1,35 м, а высота 0,9, 1,3 и 1,9 м (см. табл. 15). Соответственно определяются внутренние размеры камеры при ее длине 7 м.

По мере сужения штабеля для достижения равномерности сушки уменьшается требуемая скорость воздуха по материалу.

Поэтому в установках с побудительной циркуляцией воздуха применяют вентиляторы нереверсивные (с большим КПД и проще в обслуживании). В этом заключается технологическая особенность малых камер.

Для получения удовлетворительных результатов работы таких сушильных камер необходимо соблюдать следующие требования: 1) камера должна быть герметична, двери выполняются металлические, герметизированные по периметру; 2) ограждения камеры во избежание конденсации (потерь) влаги должны быть хорошо теплоизолированы; 3) если камера кирпичная или железобетонная, не делают воздухообменных отверстий и труб, в металлических камерах устанавливают небольшую

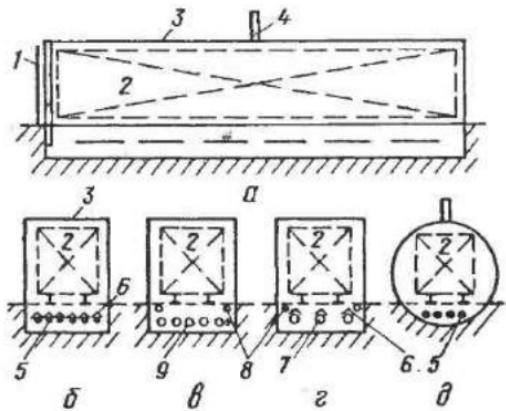


Рис. 91. Схема малогабаритной сушильной камеры:

а — продольный разрез; б, в, г — поперечные разрезы; 1 — дверь камеры; 2 — высушиваемый материал; 3 — ограждения камеры; 4 — вытяжная труба; 5 — электрокалориферы; 6 — экран калорифера; 7 — жаротрубный калорифер; 8 — увлажнительные трубы; 9 — паровой калорифер

по сечению вытяжную трубу (диаметром 100 мм), отбирающую воздух снизу, и половинного сечения приточное отверстие (с хорошо подогнанными чугунными заслонками); 4) для нагревания воздуха желательно применить электрокалориферы (ТЭНы), размещаемые равномерно в нижней части камеры и экранированные сверху (температуру регулируют ступенчато и поддерживают в каждой ступени автоматически на постоянном уровне).

Возможен паровой (рис. 91, в), а также жаротрубный (рис. 91, г) нагрев воздуха в камере с подачей в трубы продуктами горения. В этом случае предусматривают дополнительные противопожарные меры.

При высоте штабеля до 2 м равномерность просыхания материала в камерах с естественной циркуляцией удовлетворительная, если соблюдать мероприятия технологического характера: 1) тщательно укладывать материал с обязательным соблюдением вертикальности шпаций по всей высоте штабеля; 2) высушивать материал до низкой влажности; 3) применять приборы для контроля состояния воздуха и древесины в процессе сушки; 4) прижимать верх штабеля (по прокладкам) грузом массой не менее массы пяти рядов досок.

Короткие камеры

Рассмотрим камеры небольшой мощности, в которых размещается по длине один штабель пиломатериалов. На рис. 92, а, б схематически показаны камеры с торцевым вентилятором (ТВ), в заднем торцевом конце которых (противоположном двери) установлен осевой вентилятор с плоскостью вращения, направленной вдоль длины камеры.

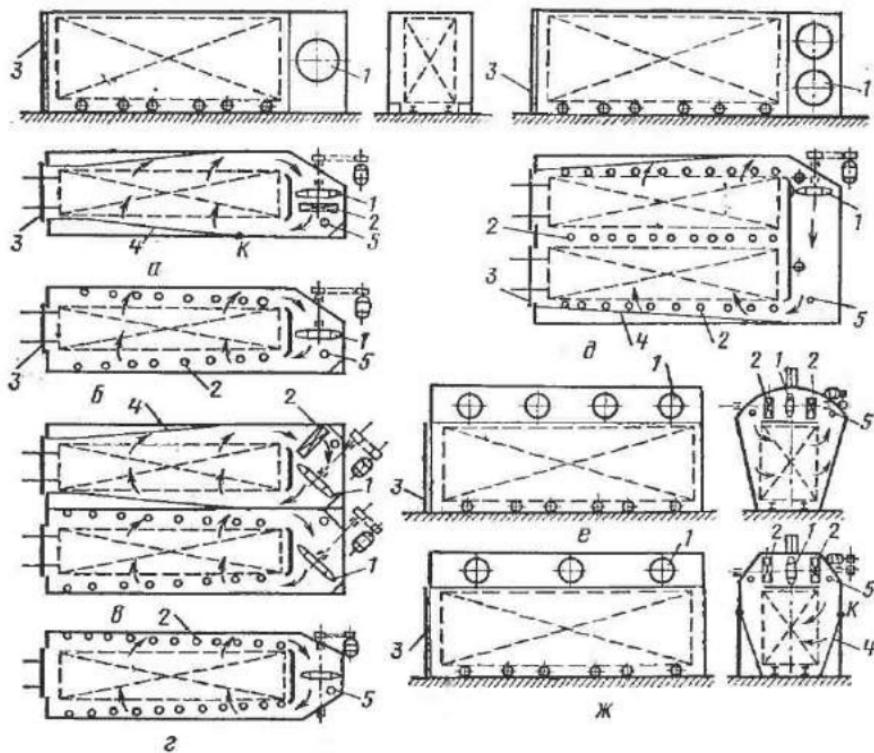


Рис. 92. Схемы коротких (одноштабельных по длине) камер:

а — камера ТВ с пластинчатым калорифером; б — то же с ребристыми трубами; в — то же с поворнутой установкой вентилятора; г — камера ТВК с выступающими кондаками наала; д — камера СПЛК-2; е — камера СПВ-62; ж — камера СПВ-63; 1 — вентилятор; 2 — калорифер; 3 — дверь; 4 — экран; 5 — увлажнятельные трубы

В табл. 16 приведено несколько типоразмеров таких камер с торцевым вентилятором, образующих гамму однотипных камер разной мощности применительно к различным производственным условиям. Их техническая особенность — единственный осевой вентилятор на одноштабельную камеру, подающий требуемый объем воздуха.

На рис. 92, в изображена (в плане) камера с повернутым в горизонтальной плоскости (примерно на 40°) валом вентилятора. При этом уменьшается требуемая площадь для установки вентилятора, кроме того, внешний подшипник вала вынесен

16. Технические характеристики малых и небольших камер

Наименование показателей	Производительность, м ³ /год					
	1000	700	500	300	200	100
Габарит штабеля $b \times h$ (ширина \times высота), м:						
a	1,8-2,6	1,35-2,6	1,35-1,9	0,9-1,9	0,9-1,3	0,65-0,9
b	1,3-4,0	—	0,9-2,6	—	0,65-1,9	
Габаритный объем штабеля F , м ³	30,8	22,3	16,3	11,3	7,7	3,9
Необходимый объем воздуха V_s , тыс. м ³ /ч	100	65	40	25	15	8
Номер вентилятора У12Д, дм	20	16	12,5	10	8	6,3
Частота вращения вентилятора n , об/мин	550	700	900	1100	1400	1600
Потребляемая вентилятором мощность N , кВт	14	9	5,5	3,5	2,2	1,2
Минимальная тепломощность калорифера Q , МДж/ч (Мкал/ч)	419 (100)	196 (70)	209 (50)	125 (33)	105 (25)	63 (15)

Примечание. См. рис. 92, а, б, в, г.

за пределы прямоугольного габарита камеры, вследствие чего улучшаются условия работы подшипника, упрощается строительное оформление камеры и снижаются ее теплопотери.

Эти камеры — наиболее простые из известных с побудительной циркуляцией воздуха. В них отсутствует подвальная часть или верхняя надстройка. Вентилятор, как и электродвигатель, монтируется на фундаменте, закладываемом в грунте. Некоторым недостатком этих камер можно считать расположение второго подшипника в неблагоприятной для него среде сушильного агента, что ухудшает условия его работы и делает неудобным обслуживание. На нижней схеме рис. 92, в показана камера МТИ-77 с ребристыми трубами.

Заслуживает внимания симметричная установка вентилятора (рис. 92, г). При такой схеме монтажа вала оба подшипника находятся вне камеры, работают в нормальных условиях, удобны для наблюдения и ремонта. Вал должен быть жестким, утолщенным.

Для отрегулирования равномерной раздачи воздуха по штабелю вместо плоских экранов 4 (рис. 92) применяют настенные

вертикальные, возможно, профильные (по высоте камеры) полки (см. рис. 80, а, справа). Преимущество полок перед плоским экраном — достижение более точной отрегулировки подачи и отбора воздуха вентилятором из материала, а также возможность обследования загруженной камеры.

В соответствии с табл. 16 камеры с торцевым вентилятором обозначаются ТВ-1319, т. е. с габаритным сечением штабеля $1,3 \times 1,9$ м или ТВК-1826, т. е. концы вала находятся вне камеры (рис. 92, г), а сечение штабеля $1,8 \times 2,6$ м. Пластинчатые калориферы, показанные на рис. 92, а, в, устанавливают вблизи вентилятора. Для снижения аэродинамического сопротивления камеры примерно $\frac{3}{4}$ объема воздуха, подаваемого вентилятором, должно проходить через обвод, сбоку калорифера. При этом сопротивление калорифера (например, КВС) уменьшится в 8—10 раз, а теплопередача на $\frac{1}{3}$.

На рис. 92, д схематически показана камера СПЛК-2, в которой на двух рельсовых путях устанавливаются рядом два штабеля пиломатериалов нормальных размеров. Между штабелями имеется вертикально смонтированный калорифер из ребристых труб для промежуточного подогрева воздуха. Его побуждение осуществляют два параллельно работающих реверсивных вентилятора № 12. Камера показала в работе положительные результаты [40].

На рис. 92, е дана схема сборной металлической камеры СПВ-62, оборудованной четырьмя вентиляторами № 10 и пластинчатыми калориферами, размещенными над высушиваемым материалом. В качестве сушильного агента проектируют применение перегретого пара атмосферного давления, выделяющегося из высушиваемого материала, но обычно пользуются нагретым воздухом и проводят нормальные или форсированные режимы сушки, добавляя в камеру воздух или позволяя ему подсасываться через неплотности в ограждениях. Эта камера модернизирована тремя вентиляторами № 12,5 и установкой боковых стен вертикально, как показано на рис. 92, ж (камера СПВ-65). На месте наклонных боковых стен устанавливают наклонные экраны 4. Точка К касания экрана со стеной должна находиться на расстоянии $\frac{1}{3} \dots \frac{1}{4}$ высоты штабеля, вниз от его верхней кромки. То же относится к рис. 92, а (для точки К — по длине штабеля). Такую камеру выполняют из кирпичной (для сушки нагретым воздухом).

Камеры средней и значительной мощности с прямым побуждением циркуляции воздуха

Длина камеры с торцевыми вентиляторами ограничена одним штабелем — на большую длину затруднительно распределить поток воздуха к материалу. При верхнем равномерном по длине камеры размещении ряда индивидуальных вентиля-

торов на поперечных коротких валах число штабелей на рельсовом пути увеличивается до 2—3 (см. рис. 92, ж). Поэтому при среднем и, тем более, значительном объеме сушки пиломатериалов применяют, как правило, двухштабельные (по длине) камеры. Их явные преимущества: в 2 раза меньшее количество дверей — уязвимых (разгерметизирующих) узлов сушильной установки; меньший фронт камер, следовательно, укороченные транспортные пути; удобство обслуживания; ущевление строительства и др.

На рис. 93, а показано размещение вентиляторов у одноштабельной (слева) и двухштабельной (рядом) камеры. У трехштабельной камеры (длиной 21 м) число вентиляторов 9, а их шаг 2200 мм.

На рис. 93, б дана схема поперечного размера камеры ВИАМ-40. Нагревательные паровые трубы расположены на верху, сбоку вентиляторов, поэтому монтировать и обслуживать калориферы затруднительно. Такие камеры групируют парами, оставляя разрыв 3,1 м для электродвигателей и одновременно для запасного штабеля пиломатериалов.

На рис. 93, в изображена в разрезе камера МТИ-1 (одноштабельная) и МТИ-2 (двухштабельная по длине) с размещением ребристых калориферных труб на продольных стенах камеры. Для повышения производительности камеры можно строить четырехштабельными (рис. 93, г) — два по длине и два по ширине (камера МТИ-2-2, где последняя цифра — количество рельсовых путей). Калориферные трубы монтируют на продольных стенах и между штабелями (для промежуточного нагревания воздуха).

Разрывы между камерами нежелательны, поэтому в Московском технологическом институте (МТИ) предложена конструкция камеры с трапециевидной верхней частью (рис. 93, д) с тем, чтобы подшипники вынести из камеры и опереть на стены. Такие камеры могут быть одноштабельными (МТИ-3), двухштабельными (МТИ-4) и четырехштабельными МТИ-4-2 (рис. 93, д справа).

На рис. 93, е показана схема поперечного разреза двухштабельной камеры с пластинчатыми калориферами (СПВ-64). Для больших мощностей камеру можно выполнить трехштабельной по длине. По данным сравнительных испытаний различных камер, лучшее качество сушки и повышенная производительность установлены в этих камерах (СПВ-62), разработанных ВНИИДМАшем и Гипроревпромом.

На рис. 93, ж дан схематический разрез четырехштабельной камеры с промежуточным подогревом воздуха, разработанной ЛТА и Гипроревром [71]. В ней применены пластинчатые калориферы (наверху) и ребристые трубы (между штабелями). Двухзонная установка разнотипных калориферов — некоторый недостаток камеры.

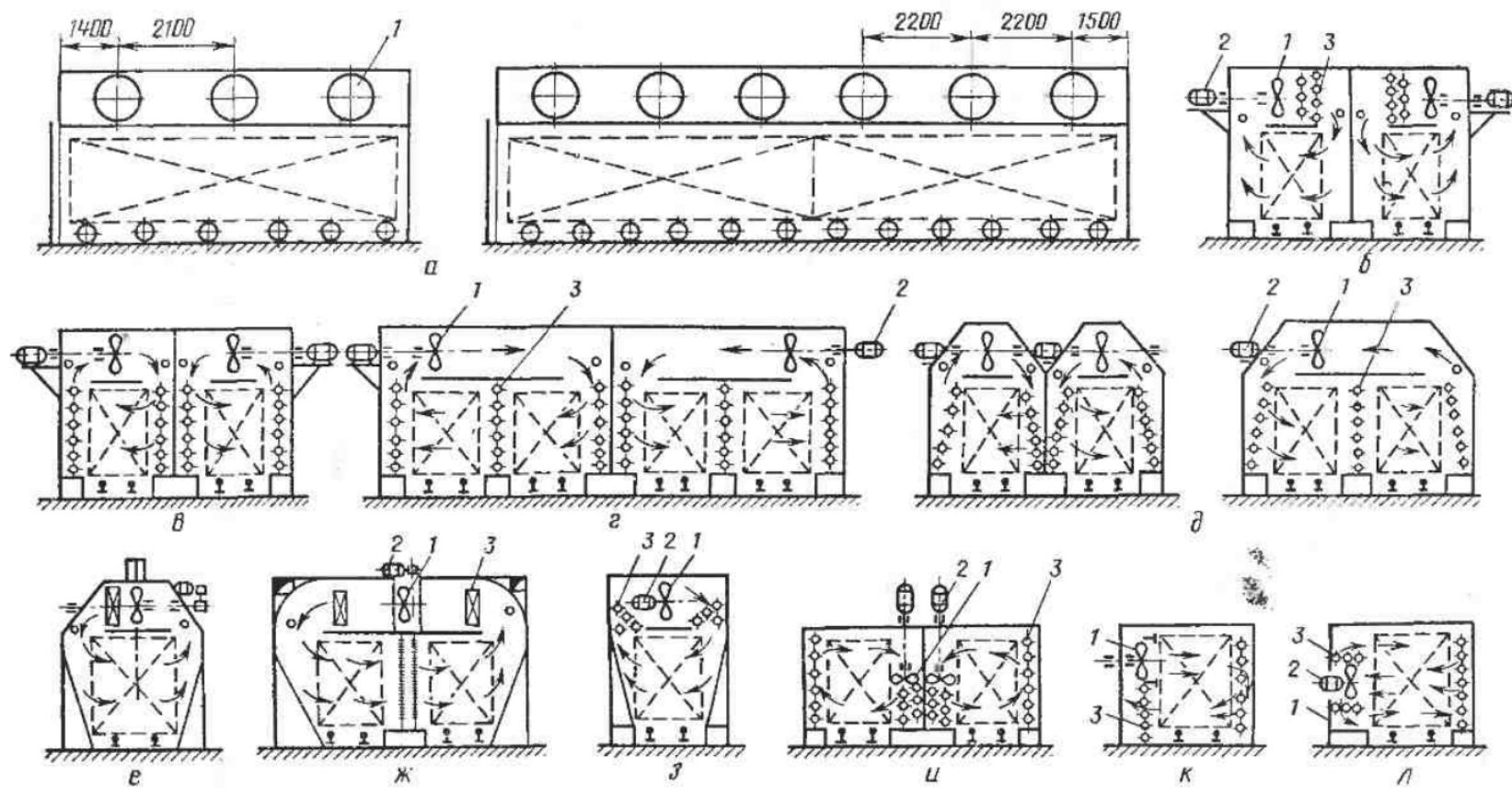


Рис. 93. Схемы паровых сушильных камер с осевыми вентиляторами на коротких валах:

a, b — камера ВИАМ-40; *c* — камера МТИ-1 (одноштабельная) и МТИ-2 (двухштабельная); *d* — камера МТИ-3 (одноштабельная) и МТИ-4 (двухштабельная); *e* — камера ЛТА — Гипрорев; *f* — шведская камера; *g* — камеры МТИ-5 (одноштабельная) и МТИ-6 (двухштабельная); *h* — вентилятор; *i* — электродвигатель; *j* — калифтер

К особенностям камеры, схема которой показана на рис. 93, з, относятся применение специального электродвигателя внутри камеры (при этом вентилятор агрегатируется с электродвигателем), а также размещение калорифера в верхней части у боковых стен камеры.

Технически интересны сушильные камеры, схемы которых даны на рис. 93, и, к, л. В этих камерах воздух, подаваемый вентилятором, дважды проходит через штабель материала во взаимно противоположных направлениях. На рис. 93, и дана схема камеры МТИ-5 (одноштабельной) и МТИ-6 (двухштабельной) с вертикальным расположением вала вентилятора. Воздух забирается вентилятором из верхней половины штабеля, подогревается и направляется в нижнюю его часть, совершающая замкнутую циркуляцию. Периодически поток воздуха реверсируется. Таким образом, для получения в штабеле нормальной скорости воздуха требуется половинное его количества, проходящее через вентилятор (по сравнению с предыдущими схемами камер, в которых воздух от вентилятора распределяется по всей высоте штабеля). Проект камеры разработан ВПКТИМ.

То же относится к польской камере (рис. 93, к), а также к камере Шильде (рис. 93, л), в которых оси вентиляторов горизонтальны. К недостаткам последних камер можно отнести ожидаемую неравномерность циркуляции воздуха с возможной его застойностью на участке штабеля между противоположными потоками, а также воздействие на материал повышенной скорости воздуха от лопаток вентилятора.

Все камеры, показанные на рис. 93, реверсивные, с паровым обогревом и индивидуальными вентиляторами на коротких, поперечных к длине камеры, валах.

С учетом положительных результатов работы камеры по схеме рис. 93, е следует отнести к эффективным в эксплуатации аналогичные по принципу действия сушильные камеры, схематично приведенные на рис. 93, в, г, д, ж. Из них можно выделить камеры с наружными подшипниками (рис. 93, д, е), аналогичные отмеченной ранее одноштабельной камере (рис. 92, г).

Для больших объемов сушки рекомендуются четырехштабельные установки. В проектах лесосушильных камер надо предусматривать меры по снижению коробления пиломатериалов в верхней части штабеля (грузовые или пневматические прижимы).

Сушильные камеры с продольным валом и шестью вентиляторами на нем схематично показаны на рис. 94. Вентиляторы монтируют как в верхней (рис. 94, а, б, д — ВИАМ-2), так и в нижней части камеры (рис. 94, в, д — ВИАМ-1). Между вентиляторами для воздуха устанавливают перегородки (рис. 94, д). При этом поток воздуха перемещается одновре-

менно как в поперечном, так и в осевом к валу направлении, неравномерно распределяясь по материалу.

Этот недостаток значительно смягчен в камерах ЦНИИМОД-23 (рис. 94, а, г, е) перегородками специальной конфигурации, а также противоположной по направлению подачей воздуха каждой группы из трех вентиляторов на обеих половинах по длине вала, где установлены вентиляторы с противоположным наклоном лопаток (рис. 94, е).

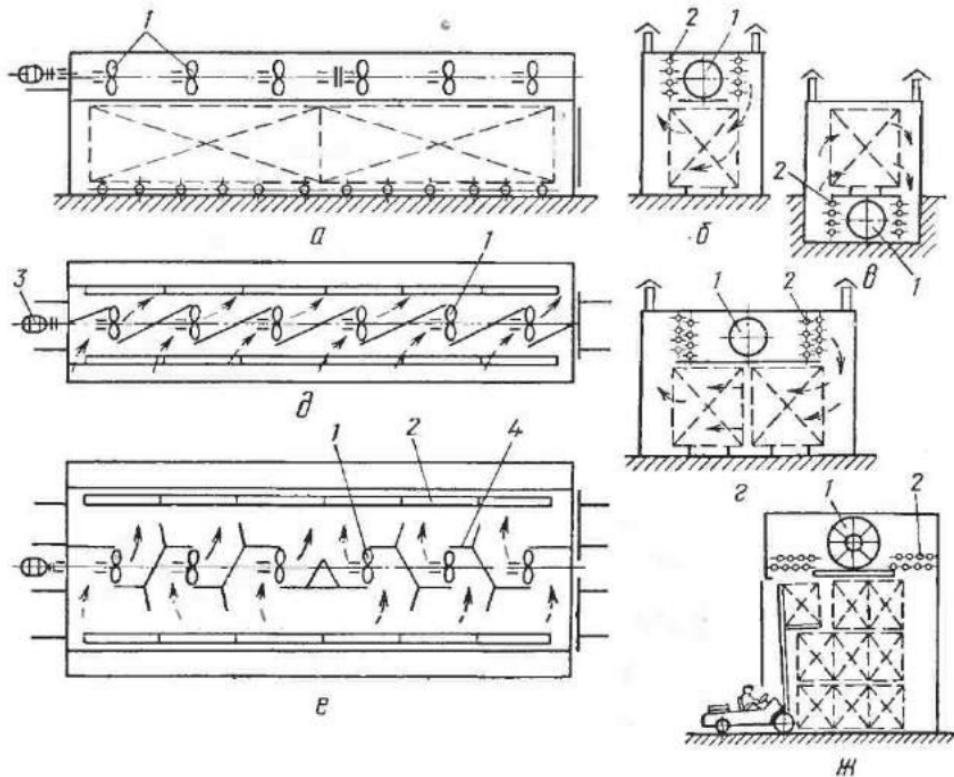


Рис. 94. Схемы сушильных камер с вентиляторами на продольных валах:
а, б, в — ВИАМ-2; в, д — ВИАМ-1; а, г, е — ЦНИИМОД-23; ж — фирмы «Мур»; 1 — вентилятор; 2 — калорифер; 3 — электродвигатель; 4 — экраны

На рис. 94, ж показана схема поперечного разреза камеры фирмы «Мур», также с несколькими вентиляторами на валу. Обращает внимание отсутствие рельсов; материал загружается пакетами посредством автопогрузчика. Недостаток камеры — большие двери (7×4 м), являющиеся местом значительных потерь тепла и влаги (вместо 2×3 м на рис. 95, а, б и др., т. е. в 4 раза больше).

К существенному недостатку камер следует отнести ненадежную работу на общем валу многих подшипников (статиче-

ски неопределенная система), тем более в условиях повышенной температуры. Ввиду этого ограничивают частоту вращения вала до 500 об/мин.

Эжекционные сушильные камеры

Камера с эжекционно-реверсивной циркуляцией воздуха, оборудованная мощным центробежным вентилятором, разработанная ВНИИДМАШем и Гипроревпромом, показана на рис. 95, а, б, в.

Вентилятором 1 через реверсивную заслонку 2 воздух подается в один из двух нагнетательных каналов 5 с соплами 3. Эжектирующие струи подсасывают подогретый воздух в камеру смешения 6 эжектора. Отсюда воздух опускается вниз и, дополнительно подогреваемый ребристыми трубами, направляется к высушиваемому материалу. Количество подаваемого к материалу воздуха около 200 000 м³/ч на два штабеля.

Для небольших объемов сушки материала применяют одностабельную камеру МТИ-7 с центробежным вентилятором Ц4-70 № 8. Вентиляторы серии Ц4-70 обладают высоким КПД (до 0,8). К материалу поступает воздуха около 100 000 м³/ч. Преимущество аналогичных камер — всего один вентилятор (Ц4-70 № 12,5), обеспечивающий подачу к двум штабелям материала значительного количества воздуха. Недостатки — воздуховоды, выделяющие тепло в коридор управления, а также неудобная для наблюдения и ремонта реверсивная заслонка 2.

Этих недостатков нет в эжекционно-реверсивной камере с двумя осевыми попарно действующими высоконапорными вентиляторами ВОК-1,0 (рис. 95, г) при 1450 об/мин. Камера проверена на МСК-1. Вентилятор закреплен на валу консольно, оба его подшипника находятся вне камеры. Динамическое давление воздуха в соплах 600—900 Па (60—90 мм вод. ст.). Верх штабелей прижимается грузом в 2 т, в массу которого входит подвесной экран эжектора. Положительная особенность камеры — простота обслуживания, равномерная раздача воздуха по длине и высоте штабеля. Мощность электродвигателя 22 кВт — не больше, чем в камерах с прямым побуждением циркуляции воздуха.

Такая камера (но с вентиляторами № 8) широко используется в промышленности. Необходима ее коренная модернизация путем: а) увеличения диаметра вентилятора до 1000 мм и, следовательно, мощности эжектирующих струй в $(10/8)^5 = 3$ раза; б) увеличения сечения и изменения формы воздухопроводов; в) замены в однопутных камерах сопел на двойные; г) консольной установки (консоль 800 мм) вентилятора на валу диаметром около 100 мм таким образом, чтобы оба его

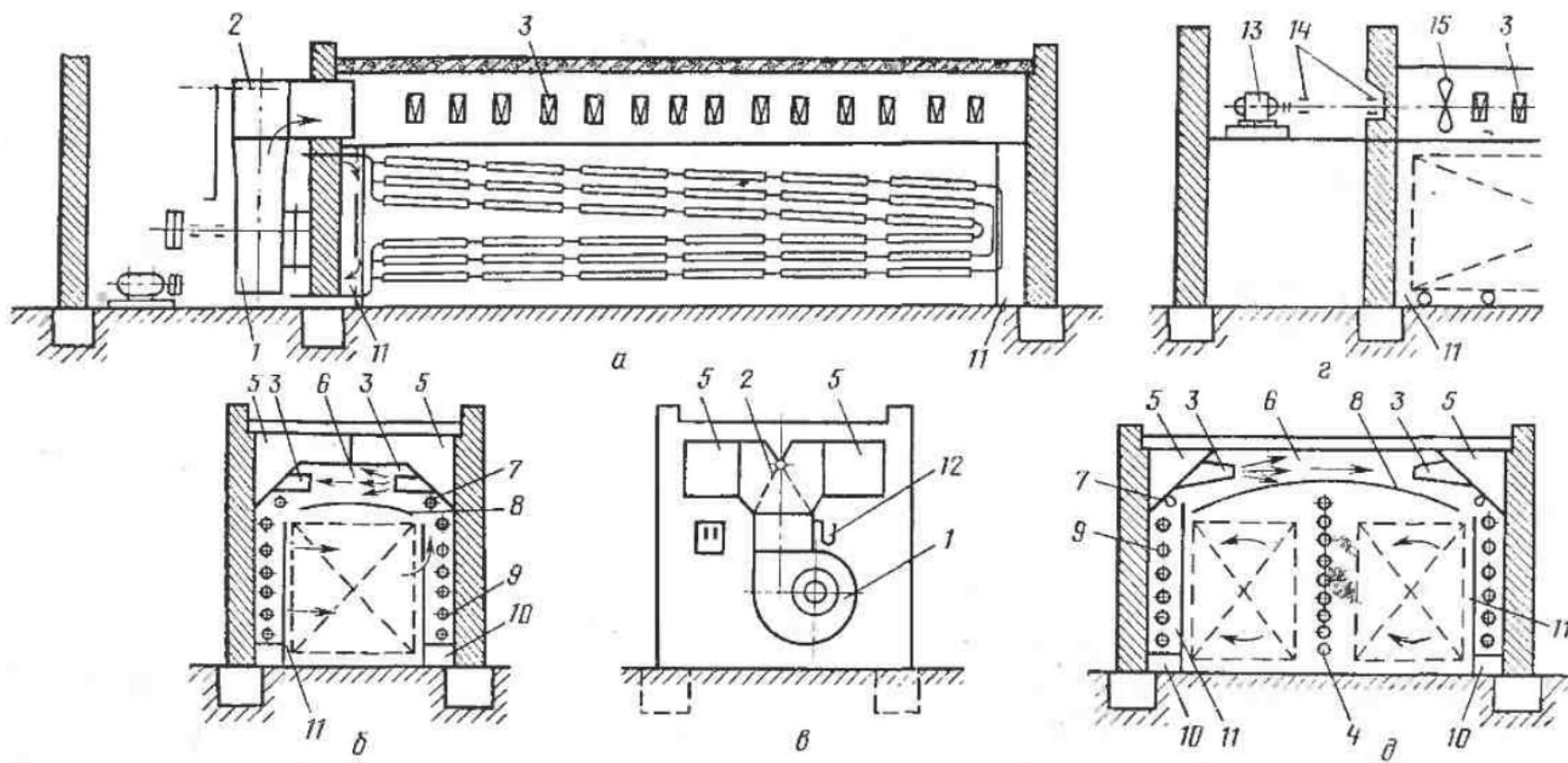


Рис. 95. Эжекционно-реверсивная сушильная камера:

a, b, c — с центробежным вентилятором; d — с осевыми вентиляторами; 1 — центробежный вентилятор; 2 — реверсивная заслонка; 3 — сопла; 4 — промежуточный калорифер; 5 — нагнетательные каналы; 6 — камера смешения эжектора; 7 — увлажнительная труба; 8 — экран эжектора; 9 — калорифер; 10 — экраны (выступы); 11 — вертикальные торцевые экраны; 12 — U-образный манометр; 13 — электродинамитель вентилятора; 14 — подшипники вентилятора; 15 — вентилятор ВОК-1,0

подшипника находились в коридоре управления. В аналогичных по системе двухпутных камерах делают то же, но применяют увеличенные конические сопла (с диаметром выхода 170 мм, шагом 700 мм).

Приоритет на создание эжекционно-реверсивных камер принадлежит нашей стране.

53. ЛЕСОСУШИЛЬНЫЕ КАМЕРЫ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ ОБОГРЕВА

Боровные (калориферные) сушильные камеры

Боровные камеры (рис. 96) часто применяют на небольших предприятиях, где нет пара: на стройках, на малых и временных производствах и т. д. Штабеля пиломатериалов — норма

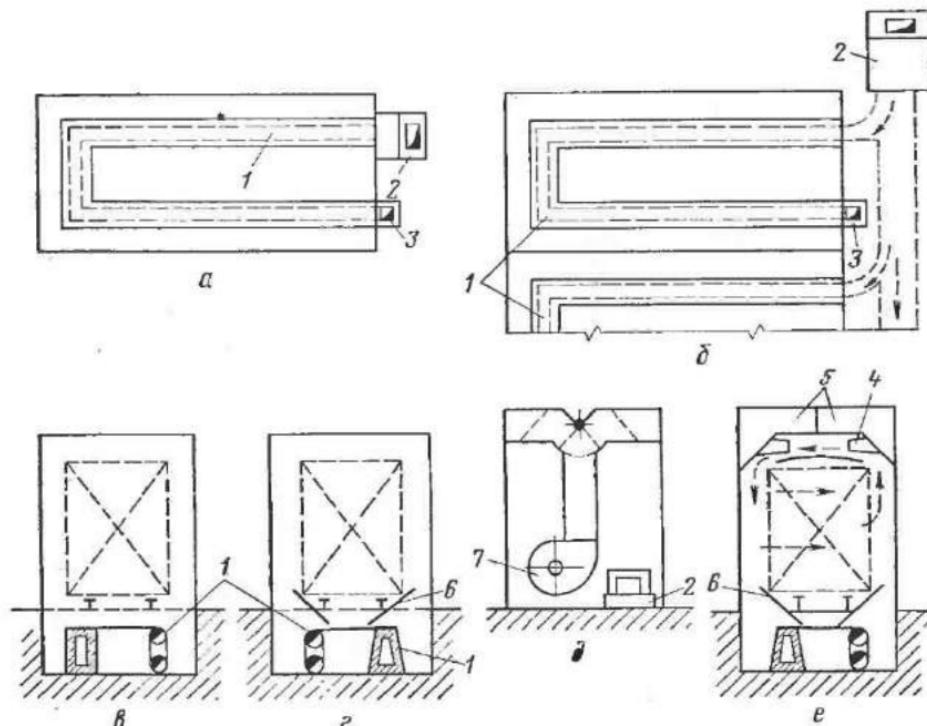


Рис. 96. Схемы боровных сушильных камер:

а — с индивидуальной топкой; б — с групповой топкой; в, г — схематичные поперечные разрезы камер; д — расположение вентилятора; е — схематичный разрез камеры с эжекционным узлом; 1 — боров; 2 — топка; 3 — дымовая труба; 4 — сопло; 5 — нагнетательные каналы; 6 — экран борова; 7 — вентилятор

мальных размеров. Для обогрева камеры устраивают топку 2, боров 1, обычно закрываемый сверху наклонным экраном 6 и дымовую трубу 3. Топка может быть индивидуальной для

каждой камеры или общей на ряд камер. В топке сжигают любой вид топлива — твердого, жидкого или газообразного.

Для интенсификации процесса и достижения более равномерного просыхания материала по объему штабеля применяют побудительную циркуляцию воздуха, в частности по схеме, показанной на рис. 96, *д*, *е*. Возможно также использование осевых вентиляторов по схеме на рис. 92, *а—г* при боковом расположении грушевой топки и хорошо теплоизолированном коллекторном газоходе под коридором управления. Боровые камеры с побудительной циркуляцией перспективны для широкого использования в небольших производствах.

Боровые камеры должны быть хорошо герметизированы; воздухообменные трубы нежелательны. Необходимо наблюдение за противопожарным их состоянием (не допускать замусоренности, неплотностей в боровах и т. п.). Камеры выполняют несгораемыми.

Газовые (бескалониферные) сушильные камеры

Одна из проверенных в промышленности систем газовой сушильной установки периодического действия, в которой в качестве топлива используются древесные отходы, показана на рис. 97.

Сушильные камеры получают горячие газы от общей топки 1 и газоходов 7; газы отбираются вентилятором 9, приводимым во вращение электродвигателем 10. К вентилятору добавляется по каналам 8 отработанный газ из сушильной камеры. В дальнейшем камера работает так же, как эжекционно-реверсивная паровая (см. рис. 95). Стоимость сушки в этих камерах значительно ниже, чем в паровых туннелях на том же предприятии.

Перспективна сушка древесины продуктами сгорания получаемыми в результате использования природного газа, процесс горения которого подвергается точной регулировке. На рис. 98, *а*, *б* показана газовая четырехштабельная сушильная камера эжекционно-реверсивного действия с двумя осевыми вентиляторами серии В № 9 (1450 об/мин). Эта камера построена при участии автора и введена в эксплуатацию на Московском ДОКе № 6. В подтопке установлены две горелки. Расход газа около 50 м³/ч. Осевые вентиляторы установлены консольно с выносом обоих подшипников в коридор управления. В камере проложены увлажнятельные трубы. В проектируемых камерах этого типа желательно применение вентилятора ВОК-1,1.

На рис. 98, *в* изображена газовая эжекционно-реверсивная камера с центробежным вентилятором ЭРВ-6 [41]. Ее особенность — компактные инжекционные горелки с туннельной насадкой вместо подтопка. Схема и размеры туннельной насадки

приведены на рис. 98, г. Ее внутренний диаметр $D_5 \approx 3D_3$, а длина $l \approx 12D_3$, где D_3 — внутренний диаметр смесителя, т. е. цилиндрического участка инжекционной горелки. К существен-

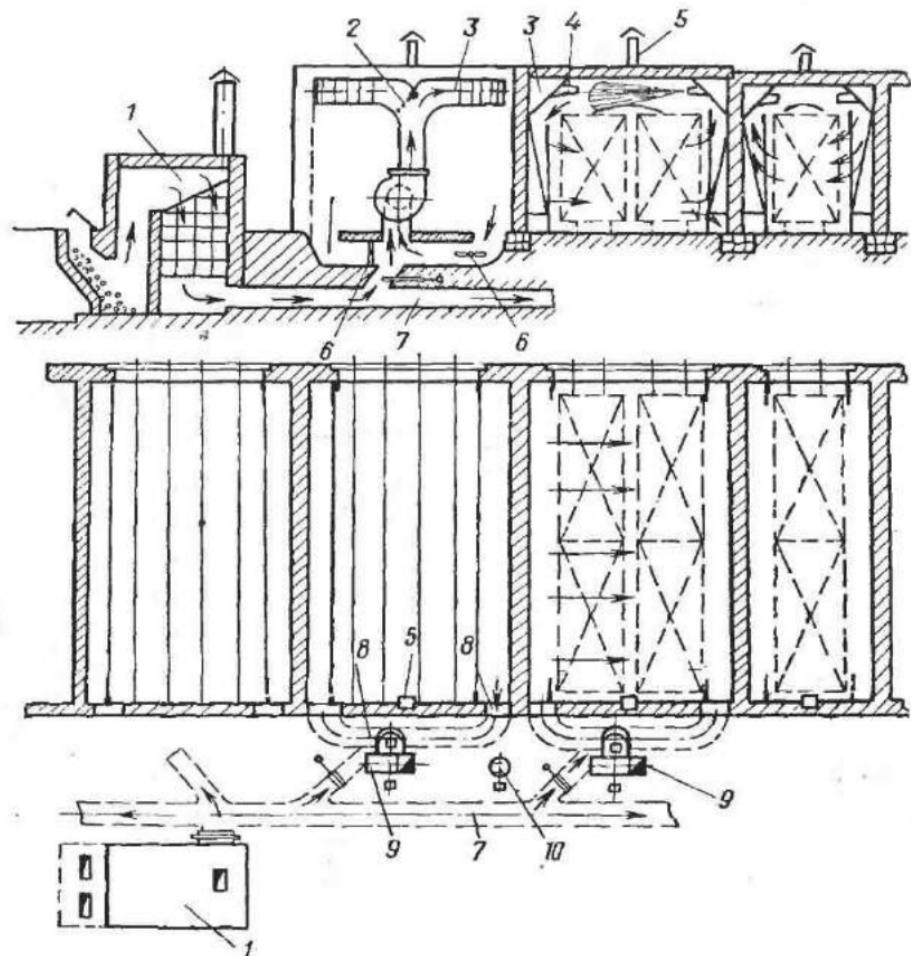


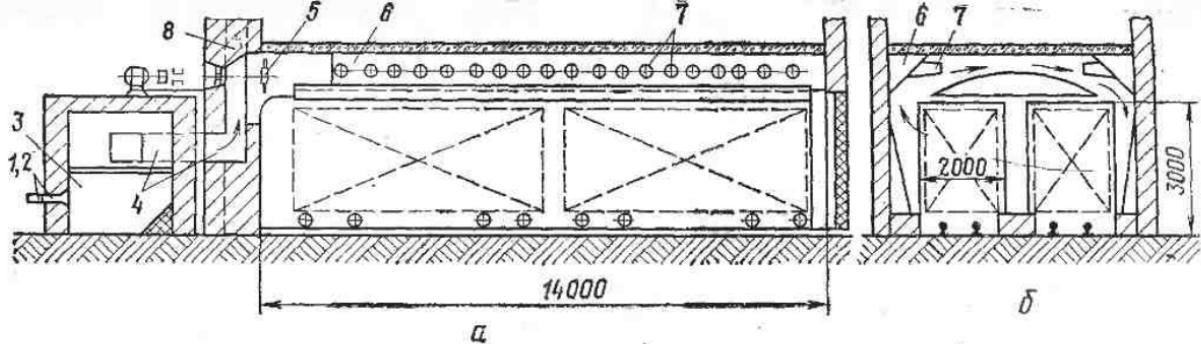
Рис. 97. Лесосушильная камерная установка на твердом топливе:

1 — топка; 2 — реверсивная заслонка; 3 — нагнетательный канал; 4 — сопло; 5 — вытяжная труба; 6 — блокированные заслонки; 7 — газоход; 8 — отсасывающие каналы; 9 — вентилятор; 10 — электродвигатель

ному недостатку камеры относится малая скорость воздуха по материалу, обусловленная недостаточными размерами вентилятора и его газоходов.

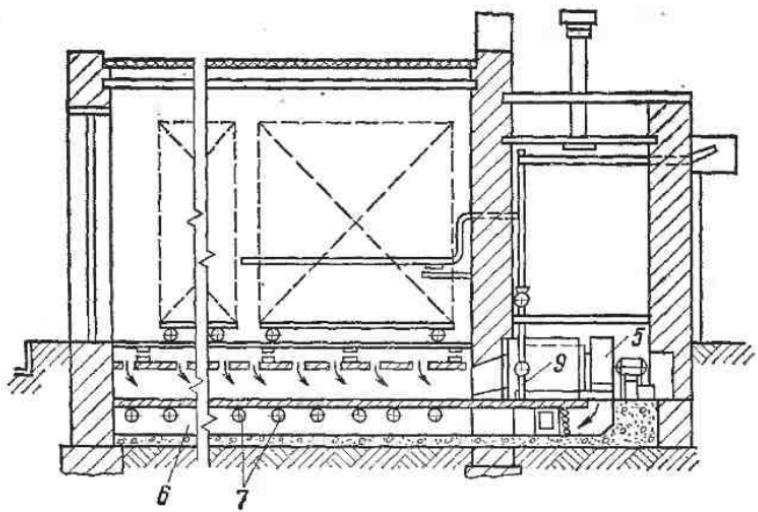
Сушильные установки с электронагревом

К таким установкам относятся в первую очередь камеры для сушки древесины токами высокой частоты. Эксплуатация многих установок показала их технико-экономическую неэффек-

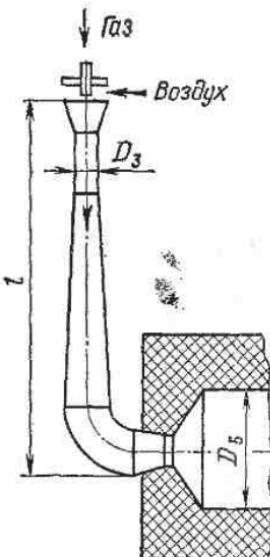


a

b



b



c

Рис. 98. Лесосушильные камеры на газообразном топливе:

a, *b* — с осевыми высоконапорными вентиляторами; *c* — с центробежным вентилятором; *г* — инжекционная горелка с туннельной насадкой; 1, 2 — основная и дополнительная горелки; 3 — подтопок; 4 — газоход подтопка; 5 — вентилятор; 6 — нагнетательный канал; 7 — сопла; 8 — вытяжная труба; 9 — туннельная насадка

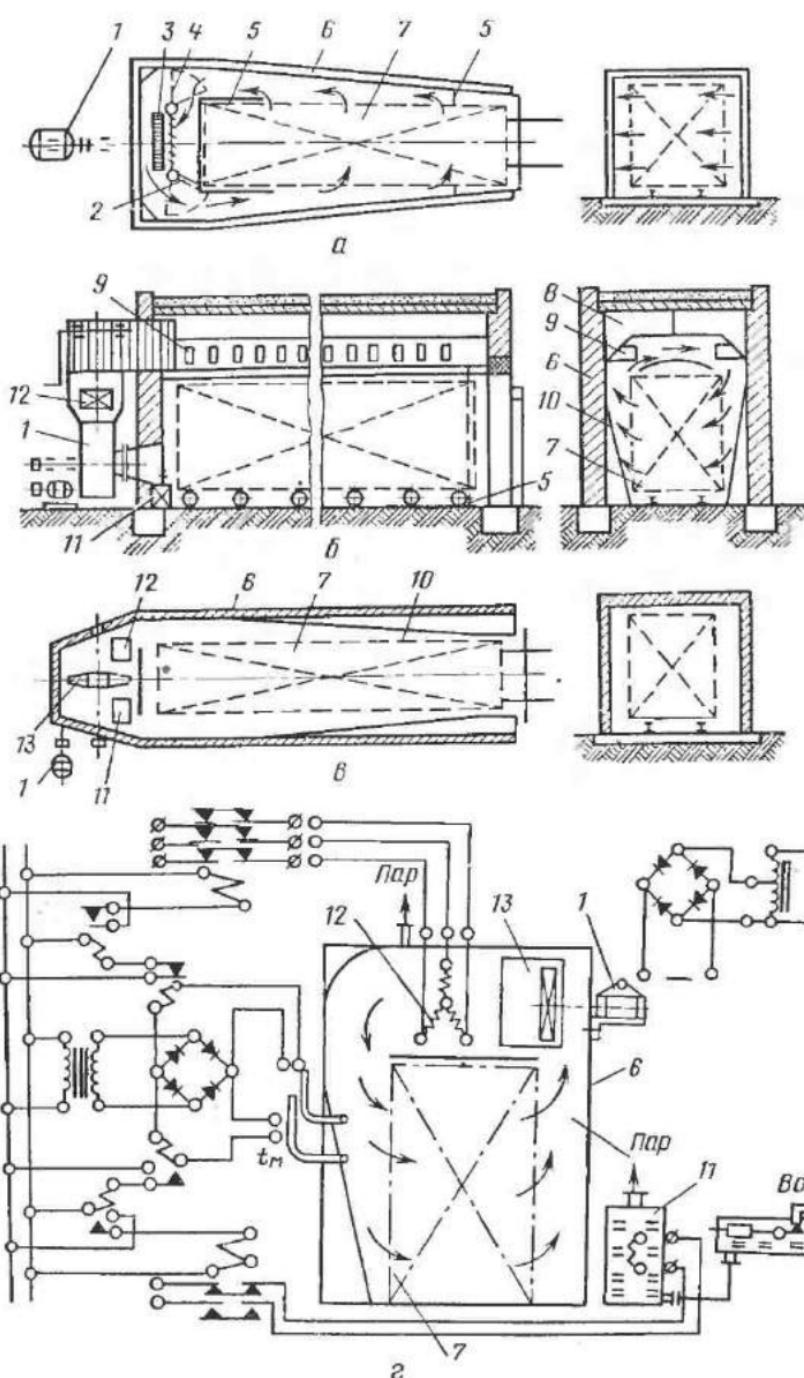


Рис. 99. Лесосушильные камеры с электрическим нагревом.

а — камера «Урал-72»; б — эжекционная камера; в — камера ТВК; г — малая автоматизированная камера УкрНИИМОД; 1 — электродвигатель; 2, 4 — реверсивные заслонки; 3 — ротор; 5 — экран у конца штабеля; 6 — ограждения камеры; 7 — штабель; 8 — на jakiательный канал; 9 — сопла; 10 — экран; 11 — электрокипятильник; 12 — электроакалофер; 13 — вентилятор

тивность, хотя древесина высушивалась в короткий срок и качественно. Их тепловой КПД по отношению к теплоте топлива, израсходованного для выработки высокочастотной энергии, 4%.

Для нагревания воздуха в сушильных камерах предложено использовать роторные вихревые нагреватели, в частности ПАП-32 мощностью 70 кВт (печь аэродинамического подогрева), получающие энергию из промышленной сети. Эти нагреватели одновременно перемещают в камере воздух. Применять такие нагреватели в лесосушильных камерах можно в том случае, если они будут подавать требуемое количество воздуха — 100 000 м³/ч на штабель нормальных размеров и в нужном направлении. Установка ПАП-32 не отвечает этим требованиям: подача воздуха на оптимальном режиме 30 000 м³/ч, а направление — вдоль досок (а не вдоль прокладок).

На рис. 99, а показана модернизированная установка с аэродинамическим подогревом воздуха «Урал-72», в которой воздух перемещается по материалу в должном направлении и с реверсированием. Скорость воздуха в средней части штабеля повышается за счет экranизации концевых его участков.

Если на предприятии нет пара и природного газа, а устройство и эксплуатация боровых камер затруднительны, при небольших объемах сушки пиломатериалов можно применять камеры с нагревом джоулевым теплом за счет энергии от промышленной электросети. В этом случае легко регулировать автономно температуру и психрометрическую разность при подаче к материалу воздуха в требуемых количествах.

Камера МТИ-10 с электроподогревом агрегатом СФО-100 (мощностью 100 кВт), рассчитанная на годовую производительность около 1000 м³ сосновых досок толщиной 50 мм, показана на рис. 99, б. Для сушки тонких досок такую камеру проектируют на пониженную производительность (в условных кубических метрах). Наиболее перспективен электронагрев воздуха джоулевым теплом в камерах (рис. 99, в) при автоматическом регулировании процесса и применении кипятильника для получения пара атмосферного давления для влаготеплоборотки материала.

При малых объемах сушки электронагрев (ТЭНами) применяют и в камерах с естественной циркуляцией воздуха (см. рис. 91, б). На рис. 99, г показана схема лабораторной камеры УкрНИИМОД с электрокалорифером 12, электрокипятильником 11 с регулятором уровня воды и вентилятором 13.

54. ЛЕСОСУШИЛЬНЫЕ ТУННЕЛИ

Паровые противоточные тунNELI

Лесосушильные тунNELI применяют для массовой поточной сушки пиломатериалов в основном хвойных пород. На предприятиях лесной промышленности используют небольшое коли-

чество сушильных туннелей Некар с естественной циркуляцией воздуха. Удельная производительность их низкая, качество сушки невысокое, укладка материала в штабеля со шпациями более дорогая. Туннели нуждаются в переделке на противоточные с зигзагообразной циркуляцией по проекту ВНИИДМАШа. Это можно сделать, установив в подвальной части вентилятор серии У № 20 с 930 об/мин и мощность электродвигателя до 40 кВт, а также увеличив высоту дверей до уровня перекрытия камеры, закрыв пол и смонтировав экраны, направляющие потоки воздуха к материалу. Лесосушильные туннели с естественной циркуляцией воздуха больше не строят.

Требованиям оптимальной сушки отвечают противоточные туннели с регулируемым количеством воздуха и еще эффективнее — с прерывистой циркуляцией воздуха по материалу средней и повышенной толщины.

На рис. 100 показаны эксплуатируемые на предприятиях разработанные ранее противоточные туннели ЦНИИМОД-24 и ЦНИИМОД-25. Длина туннелей 35 м (на пять штабелей по длине пиломатериалов). Дверной проем 2×3 м. Вентилятор осевой серии У № 12, 960 об/мин. Калорифер в туннелях ЦНИИМОД-24 компактный, пластинчатый, а в туннелях ЦНИИМОД-25 из чугунных ребристых труб.

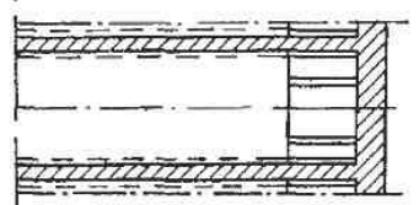
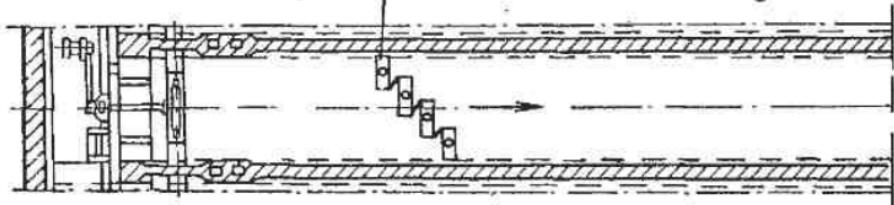
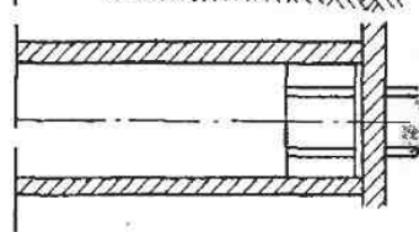
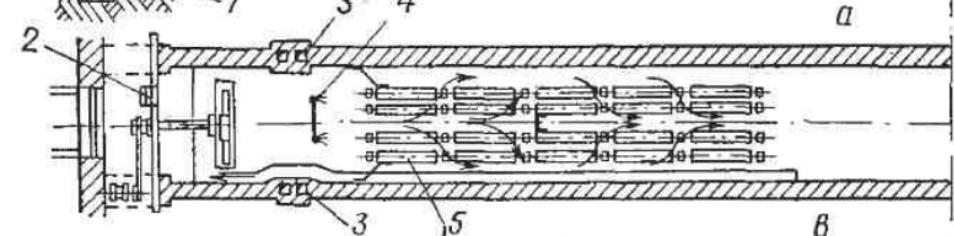
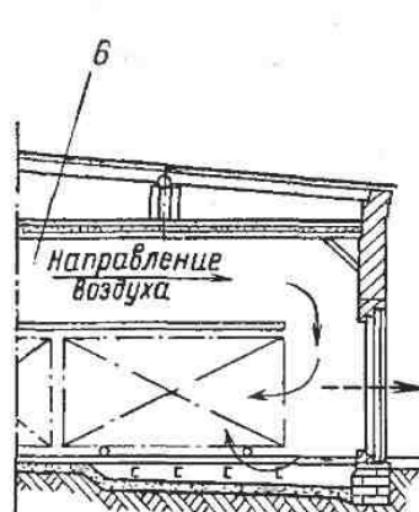
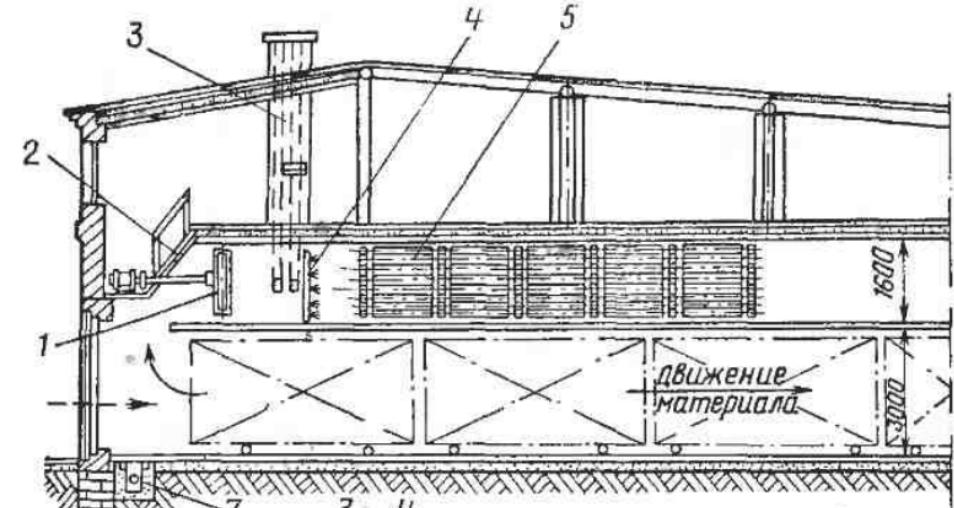
Материал укладывают со шпациями, необходимыми в данной системе для продольного перемещения воздуха вдоль досок; в этом коренной недостаток рассматриваемой системы сушильного туннеля.

Для высушивания заготовок длиной до 2 м запроектированы аналогичные, но более короткие (16 м внутри) противоточные сушильные туннели ЦНИИМОД-26 с пластинчатыми калориферами и ЦНИИМОД-27 с калорифером из чугунных ребристых труб (см. рис. 100). Ширина дверного проема туннелей 2 и высота 2,5 м. При поперечной укладке по отношению к длине туннеля заготовки размещают в штабеле без шпаций, поэтому воздух движется вдоль прокладок — единственном правильном его направлении в штабеле. Такие туннели могут быть рекомендованы и к новому строительству при условии подачи к материалу требуемых количеств воздуха с (коэффициентом $\alpha=1,3 \dots 1,5$) и устройства герметичных дверей.

Для тонких (тарных) заготовок предназначены еще более короткие туннели (внутри 10 м) ЦНИИМОД-28 с пластинчатыми калориферами и ЦНИИМОД-29 — с ребристыми трубами. Эти туннели размещают в деревообрабатывающих цехах.

Рис. 100. Противоточные сушильные туннели:

a, b, e — с чугунными ребристыми трубами ЦНИИМОД-25, -27, -29; *g, d* — с пластинчатыми калориферами ЦНИИМОД-24, -26, -28; *1* — вентилятор; *2* — приточное отверстие; *3* — вытяжная труба; *4* — увлажнительная труба; *5* — калорифер; *6* — рециркуляционный канал; *7* — конденсатоотводчик



Для высушивания досок длиной 6,5 м предложен простой по конструкции туннель с поперечной укладкой досок к направлению их движения (рис. 101). Воздух перемещается в штабелях прямолинейно от выгрузочного к загрузочному концу вдоль прокладок — в этом заключается его принципиальное преимущество. Недостатки туннеля: значительная ширина дверей, неравномерное просыхание досок по длине (древесина у концов штабеля, несмотря на установку приторцевых гибких экранов, пересыхает, а в середине его длины задерживается в сушке, особенно если часть досок длиной <6,5 м); невоз-

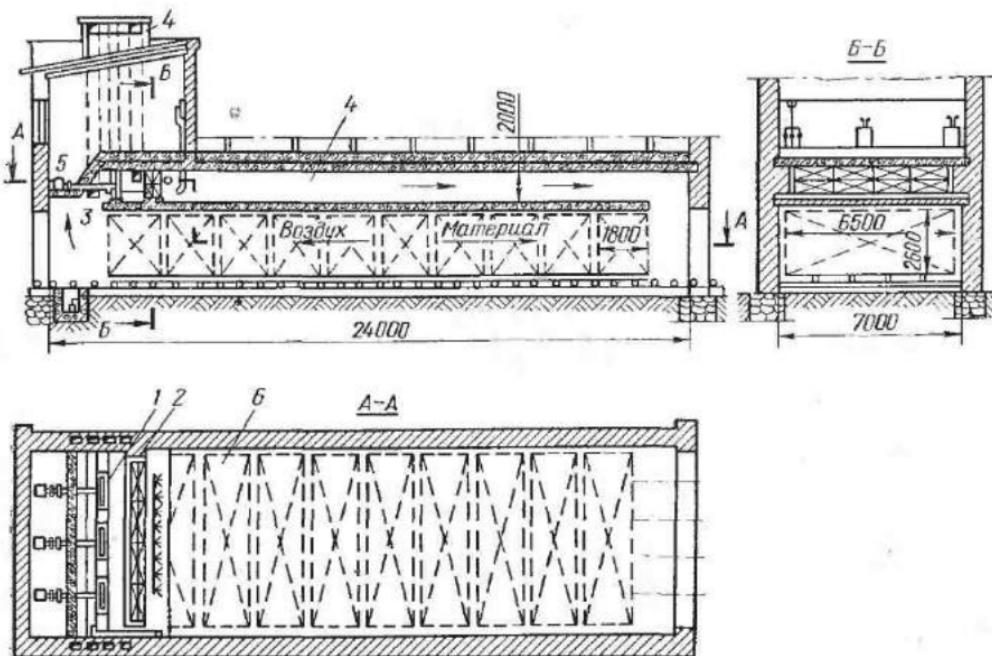


Рис. 101. Сушильный туннель ЦНИИМОД-56 с поперечной загрузкой пиломатериалов:

1 — вентилятор; 2 — калорифер; 3 — приточное отверстие; 4 — вытяжная труба; 5 — электродвигатель; 6 — высушиваемый материал

можно сушить материал длиной >6,5 м; трудно отрегулировать распределение воздуха по высоте штабеля; количество подаваемого воздуха при сушке материала различной толщины и в разное время года не изменяется, т. е. невозможно регулировать процесс по длине туннеля, а также длинные фронты загрузочных и разгрузочных работ при значительном количестве туннелей. По этой схеме запроектировано несколько модификаций таких сушильных туннелей с различными наименованиями (ЦНИИМОД-49, ЦНИИМОД-56, НБ-2 и др.).

Недостатков, указанных выше, нет или значительная их часть устранена в сушильном туннеле отечественной конструк-

ции с зигзагообразной реверсивной циркуляцией воздуха по материалу (рис. 102), с одним осевым вентилятором, вращающимся в неизменном направлении. Эти установки широко применяются. Ширина туннеля между осями 3 м, дверной проем 2×3 м. Высота штабеля в новых туннелях до 5,5 м (на 9 прокладках). Реверсивность воздуха по материалу достигается автоматически при каждом передвижении штабеля с материалом в следующую зону, так как в каждой смежной зоне по длине туннеля воздух имеет противоположное в горизонтальной плоскости направление движения. Материал укладывают в штабеля без шпаций. Туннель доступен для обследования в загруженном состоянии (через калитки в продольных стенах).

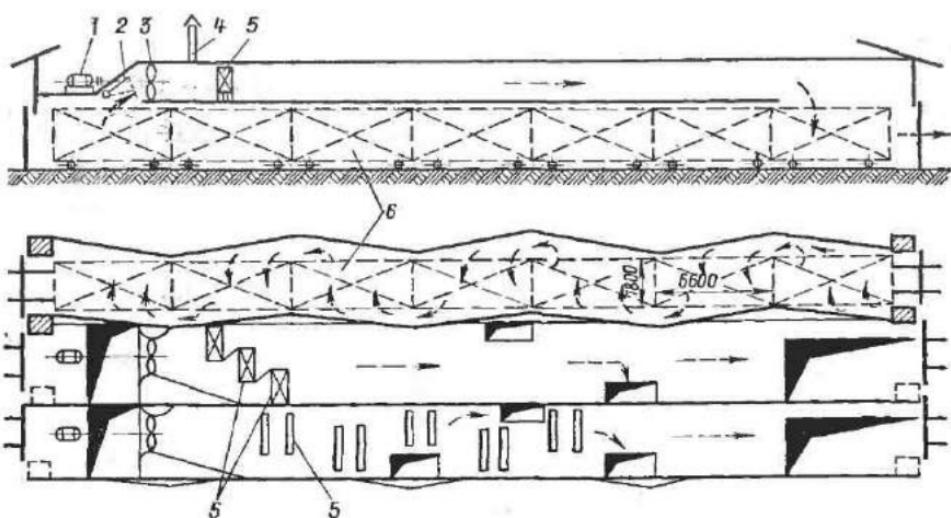


Рис. 102. Схема сушильного туннеля с зигзагообразной реверсивной циркуляцией воздуха по материалу (И. В. Кречетов):

1 — электродвигатель; 2 — клапанка для регулирования количества воздуха; 3 — вентилятор; 4 — вытяжная труба; 5 — калориферы; 6 — высушиваемый материал

Наблюдения за работой таких туннелей показали, что при движении воздуха по материалу со скоростью 2—2,5 м/с сопротивление каждого штабеля ≈ 20 Па (2 мм вод. ст.).

К недостаткам этих туннелей следует отнести необходимость своеобразной разбивки фундаментов, а также укладки зигзагообразных стен с соблюдением требований точности выполнения строительных работ. Высокие требования предъявляются к герметичности дверей, особенно выгрузочных. Если эти недостатки допускаются, режим работы туннелей нарушается: повышаются потери тепла и снижаются технологические показатели.

В технике комбинированной сушки различных материалов применяют промежуточный подогрев воздуха при последовательном омывании их материала. На рис. 103, а показан по-

перечный разрез сушильной установки камерной или туннельной с промежуточным подогревом воздуха ребристыми трубами, помещенными между штабелями. Вследствие этого можно размещать рядом несколько штабелей на параллельных рельсовых путях. Следовательно, уменьшается потребность в воздухе и снижается расход энергии на вращение вентилятора, отнесенный к единице выпускаемых сухих пиломатериалов, так как один и тот же воздух проходит последовательно через несколько штабелей, оказывающих сравнительно небольшое сопротивление движению воздуха.

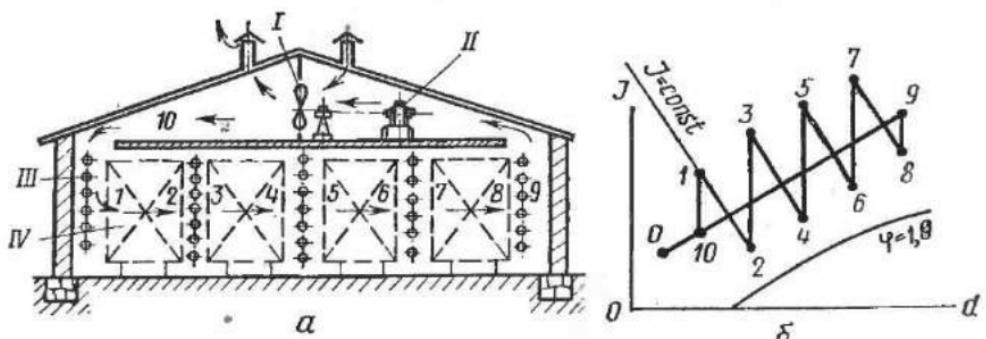


Рис. 103. Сушильная установка с промежуточным подогревом воздуха:
I — вентилятор; II — электродвигатель; III — калорифер; IV — высушиваемый материал

Теоретический процесс сушки материала с промежуточным подогревом воздуха показан на рис. 103, б. Точки 1, 2, 3 и т. д. параметров воздуха на $I-d$ -диаграмме соответствуют состояниям воздуха в сушильной установке в местах, показанных на рис. 103, а также цифрами 1, 2, 3 и т. д.

Туннельные установки по этой схеме разработаны Латгиппропромом и ЦНИИМОДом ЛТА. Они могут быть эффективными при массовой сушке одномерных материалов, когда древесина, находящаяся в штабелях на смежных рельсовых путях, просыхает с одинаковой скоростью. В первую очередь это относится к низкотемпературной массовой сушке экспортных пиломатериалов.

Для массовой сушки пиломатериалов до транспортной влажности на крупных лесокомбинатах широко применяют сборные металлические туннели заводского изготовления. Их ограждения собирают из крупных панелей, утепленных стеклянной ватой. В качестве побудителей применяют осевые нереверсивные вентиляторы в комплекте с электродвигателем, присоединяемым через эластичную муфту, и расположенным в потоке отработанного воздуха.

Материал перемещается по роликам, вмонтированным в полу, в виде пяти их рядов, с шагом около 500 мм. На роликовые шины накладывают рядом четыре швеллера, на которые

и погружается штабель материала. Каждый ряд роликов имеет по длине туннеля уклон 1:150 для свободного передвижения штабелей к разгрузочному концу туннеля; имеется также гидравлический толкатель (на загрузочном конце) и тормоз (на разгрузочном конце туннеля).

Режим сушки — низкотемпературный (мягкий) с $t_m \approx 40^\circ\text{C}$ и психрометрической разностью 10—15°С. Температура под-

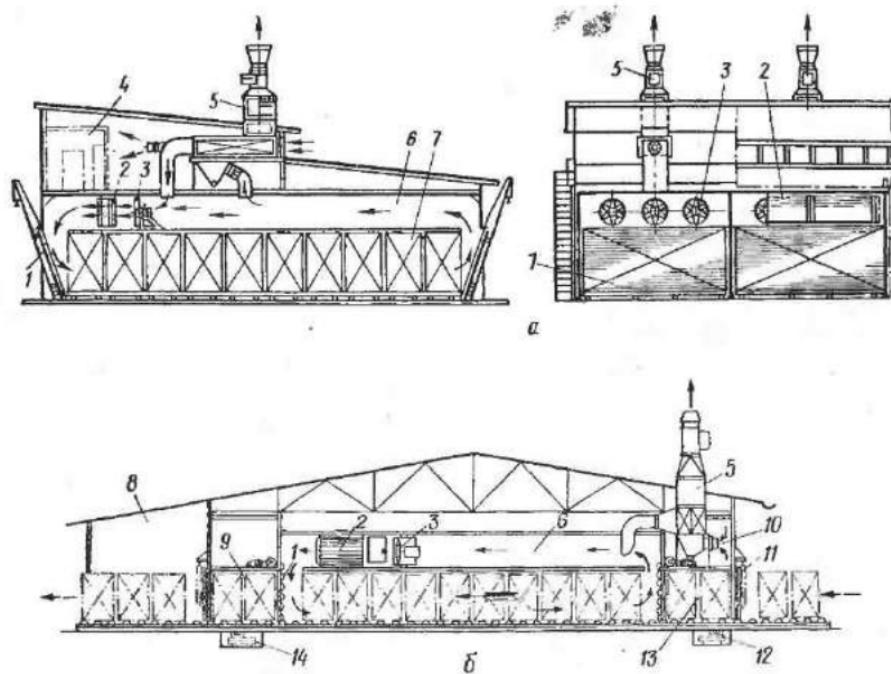


Рис. 104. Сборные металлические сушильные туннели с поперечной загрузкой штабелей:

a — «Валмет»; **б** — СП-5КМ; **1** — двери; **2** — калорифер; **3** — вентилятор с электродвигателем; **4** — коридор управления; **5** — рекуператор; **6** — рециркуляционный канал; **7** — штабель материала; **8** — навес; **9** — зона охлаждения высушенного материала; **10** — канал отработанного воздуха; **11** — откатные двери с механической тележкой; **12** — механизм затяжки штабелей; **13** — загрузочная зона; **14** — механизм выкатки штабелей

держивается на заданном уровне автоматически. В качестве теплоносителя в калориферах подают воду с температурой около 120°С, подогреваемую в бойлере паром, поступающим из котла.

Вследствие низких температур применяемого сушильного агента возникает большой воздухообмен и значительные потери тепла с отработанным воздухом. Для частичной утилизации этого тепла над туннелями установлен рекуператор для подогрева свежего воздуха, поступающего в туннель.

На рис. 104, **а** показан туннель финской фирмы «Валмет». Обращает внимание наклон дверей, его назначение отклонить поток воздуха в верхнюю часть штабеля после встречи с на-

клонной плоскостью двери. В других конструкциях туннелей этой фирмы двери показаны вертикальными, сдвигаемыми при их открывании в боковом направлении.

На рис. 104, б изображен продольный разрез по туннелю СП-5КМ. Его характерная особенность — наличие загрузочной и разгрузочной зон (отсеков), отделяемых от сушильного туннеля подъемными дверями, в виде штор. При десяти штабелях в туннеле в каждой из этих зон материал задерживается по 20% времени от продолжительности его сушки, что примерно в 3—4 раза превышает время, потребное для кондиционирования материала (если в этом возникает необходимость), а также и на прогрев. Таким образом, зоны используются неэффективно.

Калорифер обогревается горячей водой; при этом достигается более стабильная температура сушильного агента в туннелях и меньшие потери тепла.

Загрузка штабелей в туннеле СП-5КМ парами; по результатам сушки эквивалентна пятиштабельному туннелю (см. рис. 83, в и 88). Поэтому при повышенных требованиях к качеству сушки штабеля следует загружать через равные (половинные) промежутки времени по одному. Однако, если оба отсека превратить в сушильные (можно оставить парную загрузку штабелей), сушка будет равномернее (как у семиштабельного), возрастет и рабочая вместимость туннеля. Эффективнее аналогичные туннели СМ-4К без отсеков с регулируемым количеством воздуха, рассчитанные на 12 высоких штабелей.

Газовые туннели

Приоритет на газовые сушильные туннели принадлежит нашей стране. Первые освоенные газовые сушильные установки непрерывного действия «Оптимум» состоят из трех или пяти смежных туннелей, в которые подается сушильный агент одинакового состояния из общей топки одним вентилятором. Каждый туннель можно отключать при работе блока. Новые туннели не строят, но существующие продолжают эксплуатировать. Их недостаток — общий режим сушки во всех туннелях, что затрудняет высушивание разных сортиментов с различной продолжительностью процесса. Кроме того, материал необходимо укладывать в штабеля со шпациями (как в противоточных туннелях ЦНИИМОД-24 — ЦНИИМОД-25), поскольку циркуляция сушильного агента направлена по длине пиломатериалов.

На рис. 105 показаны газовые сушильные туннели, аналогичные паровым (см. рис. 102), с зигзагообразной формой стен и циркуляцией сушильного агента. Материал укладывают в штабеля без шпаций. Для побуждения циркуляции в этих туннелях использован принцип эжекции.

Из топки 1 газ отсасывается вентилятором 3 и в смеси с отработанным сушильным агентом нагнетается в канал 5; вытекая из сопел со скоростью около 40 м/с, этот газ эжектирует отработанный сушильный агент. Получившийся таким образом рабочий сушильный агент проходит через диффузор эжектора,

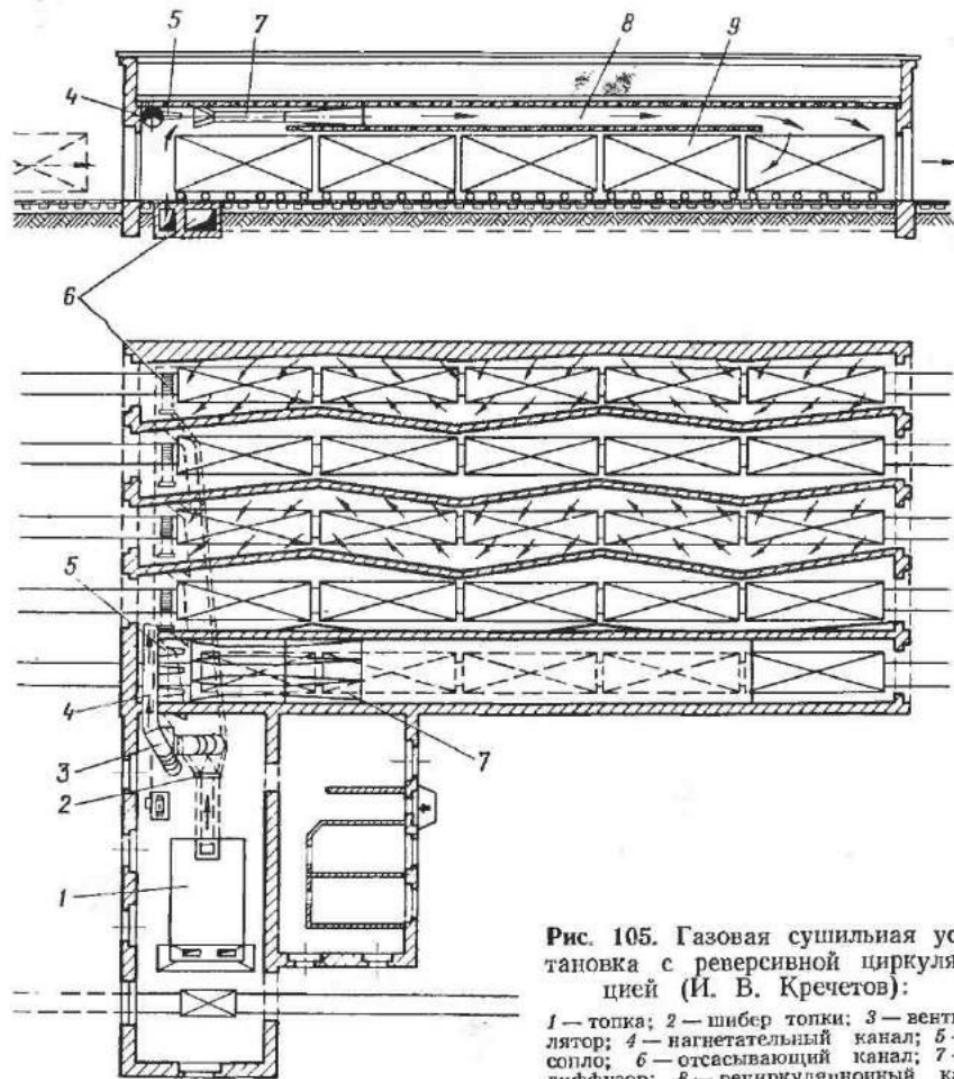


Рис. 105. Газовая сушильная установка с реверсивной циркуляцией (И. В. Кречетов):

1 — топка; 2 — шибер топки; 3 — вентилятор; 4 — нагнетательный канал; 5 — сопло; 6 — отсасывающий канал; 7 — рециркуляционный канал; 8 — диффузор; 9 — высушиваемый материал

поступает в рециркуляционный канал, а затем к материалу на выгрузочном конце туннеля. После прохождения штабелей по схеме загзагообразной реверсивной циркуляции наибольшая часть отработанного сушильного агента на загрузочном конце туннеля эжектируется, а остальная часть направляется к вентилятору для повторения цикла. Шибером на газоходе

17. Технические характеристики основных лесосушильных камер и туннелей

Тип камер и туннелей	Число штабелей длиной 6,6 м	Длина (внутри), м	Ширина (внутри), м	Глубина подава- ния или высота верхнего канала, м,	Объем* загружающего материала $\gamma = 50$ м ³ / м ³	Площадь производ- тельности, усл. тыс./м ²	Количество	Вентиляторы		
								Тип и размер	Частота враще- ния, об/мин	Мощность электо- родвигателя, кВт
Сушильные камеры										
«Грум» однопутная	2	14	2,4	1,2	20	1,5	P-144	—	—	—
ВИАМ-40	2	14	3,1	1,4	30	3,0	P-240	6	У12Р-№ 10	1450 $4,0 \times 6$
МТИ-1 и МТИ-3	1	7	3,1	1,4	15	1,5	P-240	3	У12Р-№ 12,5	860 $4,0 \times 3$
МТИ-2 и МТИ-4	2	14	3,1	1,4	30	3,0	P-480	6	У12Р-№ 12,5	860 $4,0 \times 6$
Эжекционная Ц	2	14	3,1	1,4	30	3,0	P-480	1	Ц4-76№ 12,5	830 22
Эжекционная Ц2	4	14	5,6	1,5	60	6,0	P-720	1	Ц4-76№ 12,5	830 22
Эжекционная Ос	2	14	3,1	1,4	30	3,0	P-480	2	ВОК-1,0	1450 22
Гипрорев — ЛТА	4	14	5,6	1,5	60	8,0	ПиР-960	6	У12Р-№ 10	1200 $4,0 \times 6$
СПВ-62	1	7	3,0	1,5	15	2,0	П-325	4	У12Р-№ 10	1200 $4,0 \times 4$
СПВ-65	1	7	3,1	1,5	15	2,0	П-325	3	У12Р-№ 12,5	900 $5,5 \times 3$
СПВ-64	1 и 2	7 и 14	3,1	1,5	15 и 30	4,0	П-600	3 и 6	У12Р-№ 12,5	900 $5,5 \times 6$
СПЛК-2	2		5,8	—	30	3,0	P-350	2	У12Р-№ 12	960 $5,5 \times 2$

Сушильные туннели

ЦНИИМОД-24 (25)	5	35,2	2,0	1,5	67	4,0	П-180 или Р-320	1	У12-№ 12	1300	13
ЦНИИМОД-26 (27)		16,5	2,0	1,4	27	1,6	П-100 или Р-192	1	У12-№ 12	960	5,5
По схеме ЦНИИМОД-32	6 или 7	42 или 49	2,6	1,8	90 или 105	9 или 10,5	П-400 или Р-700	1	У12-№ 16	720	17
То же газовые	5	36	2,6	1,5	75	7,5	—	0,2	D 20	500	55
ЦНИИМОД-56	10	24	7,0	1,5	150	15	П-480	3	В-№ 12	960	13 × 3
Валмет	10	20,5	7,2	1,8	150	15	П-550 и Рекуператор П-3000	3	№ 12,5	960	20 × 3
СП-5КМ	10+4	31	7,0	1,8	180	15	382	3	В-№ 11	1300	22 × 3

Примечание. Эжекционная Ц — камера с центробежным вентилятором; эжекционная Ц2 — то же, но с двумя рельсовыми путями, т. е. с четырьмя штабелями; эжекционная Ос — камера с осевыми высоконапорными вентиляторами; У12Р — № 10 — универсальный с 12 лопатками реверсивный — № 10; В — высоконапорный; П — пластинчатый калорифер; Р — калорифер из ребристых труб.

автоматически поддерживается постоянная температура газа в вентиляторе.

На Волгоградском ДОКе им. Ермана сушильная установка этой конструкции работает на природном газе. Производительность установки из пяти туннелей 37 000 м³/год. Установка оборудована только одним вентилятором. На ряде предприятий устроен двойной блок из 10 смежных туннелей при двух установленных топках.

Производственные недостатки этих сушильных туннелей обычно состоят в малой производительности вентиляторов (требуется около 30 м³/с при давлении 1500 Па (150 кгс/м²) и мощности около 55 кВт), неудовлетворительном монтаже сопел (отсутствие их соосности с осью камеры смешения эжектора) и негерметичности дверей.

К неотложным мероприятиям по приведению этих сушильных туннелей в нормальное состояние относятся: а) устройство металлических дверей с винтовыми прижимами на забетонированной в стену металлической опорной раме; б) устройство у дверей разгрузочного конца опрокидывающихся рельсов (для лучшего закрывания дверей); в) замена устаревших по конструкции и недостаточных по размеру вентиляторов на дымососы № 20; г) установка сопел (с выходным диаметром 250 мм) строго соосно с цилиндрическими камерами смешения эжектора (диаметром 700 мм); д) улучшение экранизации штабелей по их периметру; е) отрегулировка работы топки со стабильным получением бездымящих продуктов горения [13].

Лучшее топливо для газовых сушильных туннелей — природный газ, затем сырая дробленка. Во ВНИИДМАШе разработан проект модернизации этой сушильной установки, предусматривающий увеличение ее мощности в 2 раза.

В табл. 17 приведены технические и производственные характеристики основных лесосушильных камер и туннелей. Камеры СПВ-64 и СПВ-65 аналогичны камерам СПВ-62, так же как и кирпичные МТИ-1-4; у них общее аэродинамическое решение (у последних — более надежные для длительной эксплуатации калориферы — настенные ребристые трубы). Эжекционные камеры с центробежными и осевыми вентиляторами — взаимозаменяемы.

55. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВЫСУШЕННЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Для кондиционирования высушенных пиломатериалов, улучшающего их качество, а также расширения областей применения туннельной сушки в составе сушильного цеха должны быть специальные камеры или туннели кондиционирования. Желательно высвободить от проведения этой операции также

сушильные камеры с пластиначатыми калориферами из-за быстрой их порчи.

На рис. 106, а изображена камера для кондиционирования пиломатериалов. Она состоит из хорошо утепленных и пароизолированных ограждений, рельсовых путей для закатки материала, небольшого настенного (у пола) калорифера (для компенсации теплопотерь в зимних условиях работы), а также перфорированных труб, расположенных продольно по одной

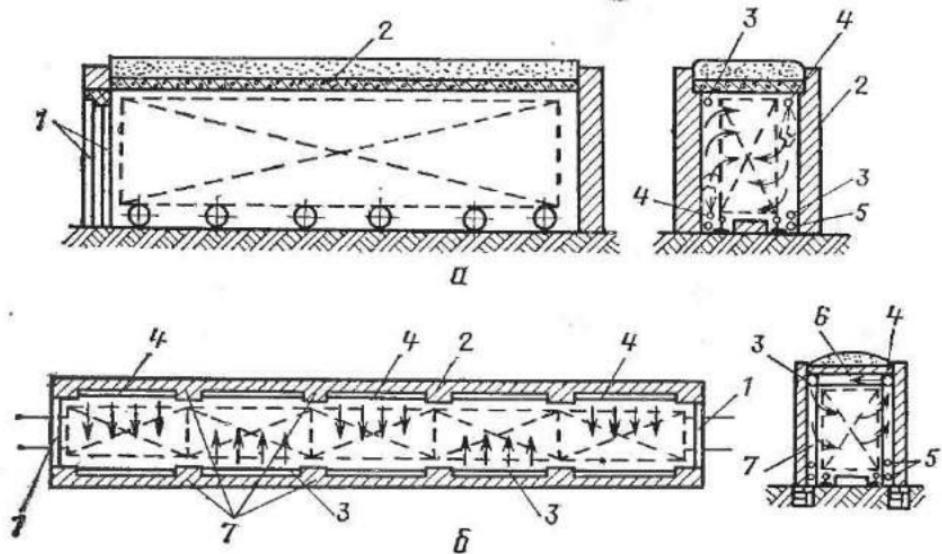


Рис. 106. Установки для кондиционирования пиломатериалов:

а — камера, б — туннель; 1 — двери; 2 — ограждения; 3 — пропарочная труба реверсивного действия; 4 — пропарочные трубы; 5 — калорифер; 6 — потолочный выступ; 7 — вентилисты

в каждом углу камеры. Трубы имеют отверстия для выброса струй пара в камеру в вертикальном направлении и подключены к вентилям таким образом, чтобы одновременно действовали две диагонально противоположные трубы. При переключении вентиляй циркуляция газообразной среды в камере изменится на противоположную, т. е. реверсируется. Проект такой камеры разработан ВНИИДМАШем.

На рис. 106, б показан туннель для кондиционирования пиломатериалов. На внутренней стороне стен на равных расстояниях (соответственно длине штабелей) выполнены пиластры, а против них в перекрытии — выступы. Вдоль туннеля в верхних углах находятся трубы с отверстиями в боковом направлении; пар выходит последовательно из одной, а затем из другой трубы. Обе трубы подключены к общему вентилю, поэтому в смежных зонах туннеля возникает реверсивная циркуляция пара в штабелях материала. При продвижении

штабелей в следующую зону они омываются противоположным потоком пара.

Туннели кондиционирования рекомендуется встраивать в общий блок с сушильными туннелями, с выводом рельсовых путей на общий траверсный путь.

Увлажнительные трубы в камерах кондиционирования, как и в сушильных камерах, проектируются диаметром 50 мм, а в туннелях кондиционирования 65 мм, начиная от паромагистрали. В требуемом участке трубы насверливают (по предварительной разметке точно в одном направлении) отверстия диаметром 5 мм с шагом 200 мм. Конец трубы заглушают.

56. СТРОИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Общие требования

При строительстве стационарных сушильных установок в первую очередь учитывают требования наилучшего осуществления в них намеченного процесса сушки, а также надлежащих условий эксплуатации.

Кроме строительных требований, общих для большинства сооружений (прочность, минимальные затраты, соблюдение по возможности сетки колонн кратной 3 м, отсутствие тепловых мостов в металлических камерах, учет тройного термического расширения алюминия по сравнению со сталью и т. д.), лесосушильные установки должны удовлетворять следующим специфическим требованиям: быть герметичными, влаго- и паронепроницаемыми, обладать малой теплопроводностью ограждений и быть стойкими в условиях повышенной насыщенности пара и выделения паров кислот высушиваемой древесиной.

Фундаменты кирпичных или бетонных промежуточных стен стационарных сушильных установок делают бутовыми. При сухих грунтах применяют известковый раствор, при влажных — смешанный, а при укладке ниже уровня грунтовых вод — цементный.

Грунт вблизи сушильных установок зимой мало промерзает или даже совсем не замерзает, поэтому глубина фундаментов может быть меньше, чем в обычных сооружениях.

Герметичность ограждений

При неплотных ограждениях или конденсации в их толще и утечке наружу влаги в камере (туннеле) трудно поддержать требуемое высокое влагосодержание сушильного агента. Потенциалом течения (потерь пара из камеры путем диффузии и молярного потока через пористые неплотные ограждения)

является перепад общих давлений, а также большая разность давлений пара внутри камеры и снаружи.

Влажные строительные материалы более теплопроводны, через них теряется много тепла, и кроме того, внутренняя поверхность ограждений в этих условиях холоднее. Она выполняет роль конденсатора, дополнительно осушая воздух в камере. Поэтому зимой наблюдается конденсация влаги изнутри на стенах и перекрытиях камер. Мокрая поверхность ограждения служит признаком недостаточной его теплоизоляции. Необходимо поэтому защитить внутреннюю сторону ограждения от увлажнения, тогда вся его толщина будет более сухой и, следовательно, менее теплопроводной.

Стены стационарных камер обычно кладут кирпичные на смешанном, желательно теплом растворе. Слабо обожженный (розовый) или силикатный (белый) кирпич для кладки стен не допускается. Толщину наружных стен принимают обычно в 2,5 кирпича, промежуточных — в 1—1,5 кирпича. Кладка стен в *пустошовку* во избежание фильтрации воздуха и конденсации влаги *не допускается* (по этой причине в смежных бездействующих камерах наблюдаются почти такие же параметры воздуха, как и в работающих). Существует ряд конструкций железобетонных стен с утеплителями.

Перекрытие камер делают железобетонным с прокладкой поверху двух слоев рубероида на клебемассе или пеке и засыпают сверху утеплителем. В качестве утеплителя используют мелкий, тщательно просеянный шлак (однако он тяжел), древесную просеянную золу, опилки, смоченные алебастровым раствором, и теплостойкие теплоизоляционные плиты. Толщина теплоизоляции 20—30 см. На сыром (загрузочном) конце туннелей теплоизоляцию усиливают.

Для пароизоляции внутреннюю поверхность стен, перекрытия, пола штукатурят цементным раствором слоем 15 мм и железнят цементом, а затем в хорошо нагретом состоянии (выше 100°С) покрывают разогретым битумным лаком 177 (ГОСТ 5631—70) или двукратно промазывают мастикой из нефтяного битума (ГОСТ 8771—76) на уайт-спирите (53% тугоплавкого битума и 47% уайт-спирита или керосина). Снаружи стены не штукатурят, а выполняют под расшивку швов; влага из стен должна свободно переходить в окружающий воздух.

Двери — самая ненадежная часть сушильных установок. Работая в неблагоприятных условиях влажности и температуры, они обычно неплотно закрываются, конденсируют изнутри влагу и быстро приходят в негодность. У большинства сушильных камер при проведении сушки с высоким влагосодержанием воздуха наблюдается скапливание воды у дверей; они являются конденсаторами влаги (из камеры). Такие двери необходимо перепроектировать на герметичные, утепленные

с коэффициентом теплопередачи менее $1,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [$1,3 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$] и заменить на новые.

Двери выполняют в сварном каркасе из уголков и швеллеров. С обеих сторон дверное полотно покрывают алюминиевыми листами толщиной 1,5—2 мм. Герметизируют створы дверей уголками, образующими пазы, в которые набивают асбестовый шнур (рис. 107, б, в, г). Для уменьшения массы применяют

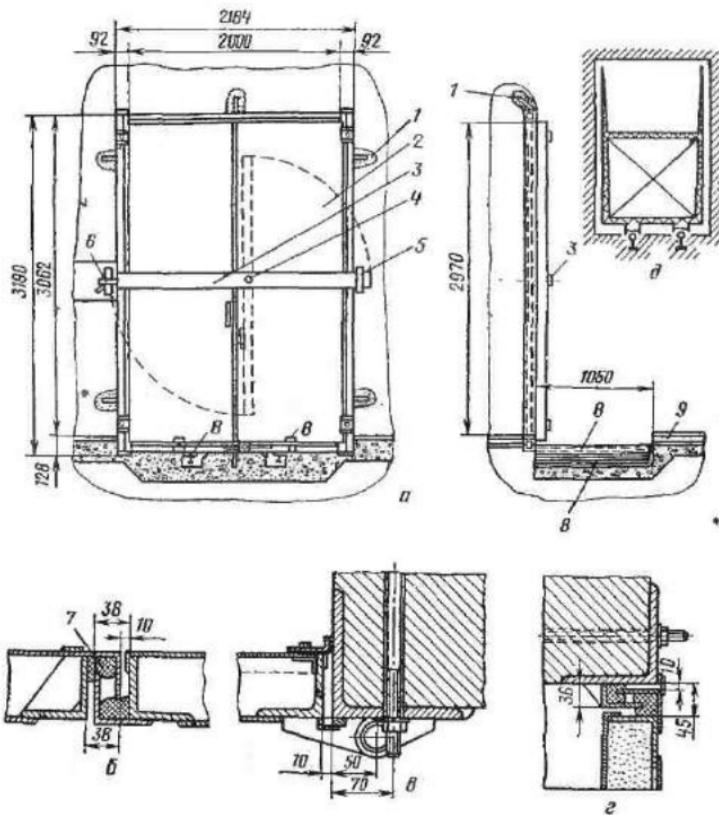


Рис. 107. Дверь конструкции ВПКТИМ:

а — общий вид; б — средний створ; в — боковой створ; г — верхний створ; д — шабельный шаблон; 1 — крепление рамы в проеме; 2 — полотно двери; 3 — поворотный рычаг; 4 — ось вращения рычага; 5 — крюк в стене; 6 — откидной винт, прикрепленный к стене; 7 — набивка паза (асбестовый шнур); 8 — опрокидывающиеся рельсы; 9 — неподвижный рельс

дюралевые сортименты. Чтобы уменьшить стыковые соединения при закрывании, двери в металлических камерах устраивают одностворчатыми; однако такие двери тяжелы. Дверь крепят в железобетонный проем 2×3 м, обрамленный уголком № 15, к которому приваривают дверные петли. Для герметизации створов в нижней части перед дверью устраивают съемные или опрокидывающиеся в нишу на шарнирах участки рельсов длиной около 1 м.

Существует много различных конструкций дверей, а также дверных прижимов, устраиваемых обычно винтовыми, однако ни одна из них не принята в качестве типовой. Практически проверенная конструкция прижима с рычагом, прикрепленным и поворачивающимся в вертикальное положение на наружном створе двери при ее открывании, показана на рис. 107, а. Двери изготавливают заводским способом.

К рельсовому пути (колея обычно 1000 мм, а при высоких штабелях 1200 мм) предъявляют повышенные требования: прямолинейность рельсов, укладку их на одной высоте, постоянство ширины колеи, отсутствие выступов и стыковых разрывов, а главное, симметричность прохождения их в дверном проеме; кроме того, не должно быть местного проседания одного из рельсов, особенно в этой зоне. Если требования не выполняются, это приведет к загрузке в камеры или туннели неполногрузных штабелей, к ухудшению циркуляции воздуха по материалу.

С помощью реечного габаритного штабельного шаблона (рис. 107, б) шириной 1900 и высотой 2900 мм, базированного на рельсы у открытых дверей, выявляют и устраняют неправильность прохождения рельсового пути в дверном проеме. Сам шаблон должен быть правильным (показывать одинаковые зазоры по его периметру до элементов дверного проема после поворота на 180° и вторичной установки на рельсы).

ГЛАВА 9. СУШИЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

57. ТОПКИ И ОГНЕВЫЕ КАЛОРИФЕРЫ

Условия бездымного сгорания топлива

В сушильных установках, обогреваемых непосредственно продуктами сгорания, сжигают твердое, жидкое и газообразное топливо. В качестве твердого топлива используют сырье древесные отходы, преимущественно дробленку, а иногда срезки, рейки и т. п. Жидким топливом является малосернистый топочный мазут, а газообразным — природный газ.

Методы бездымного сжигания хорошо распыляемого мазута и разбавляемого в воздухе природного газа более просты; к тому же они обстоятельно разработаны в топочной технике. Поэтому в случаях применения такого топлива используют проверенные теплотехнические решения и приемы из других отраслей промышленности. При сжигании в слое древесных отходов возникают некоторые трудности в сохранении стабильного горения и, следовательно, получении продуктов бездымного сгорания. Необходимо иметь соответственно запроектированное топочное устройство и соблюдать инструкцию по режиму его эксплуатации.

Бездымные продукты сгорания будут получены при горении древесного топлива в толстом слое примерно неизменной объемной массы, т. е. в условиях непрерывного пополнения загруженной топки топливом и стабильной подачи в нее воздуха. Дым возникает в охладившейся топке, а в раскаленной — при очень длинном пламени (из-за недостатка вторичного воздуха) [13].

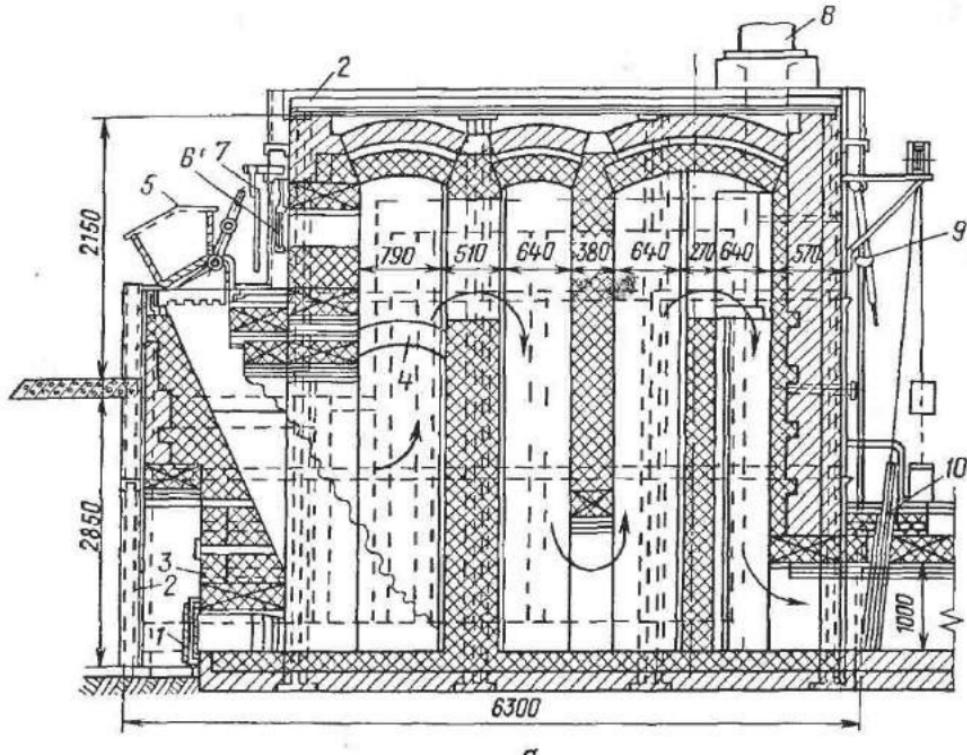
Топки газовых лесосушильных установок

В газовых лесосушильных установках преимущественное применение получили бесколосниковые полугазовые топки системы В. Е. Грум-Гржимайло, разработанные Стальпроектом. В них сжигают кусковые древесные отходы и дробленку.

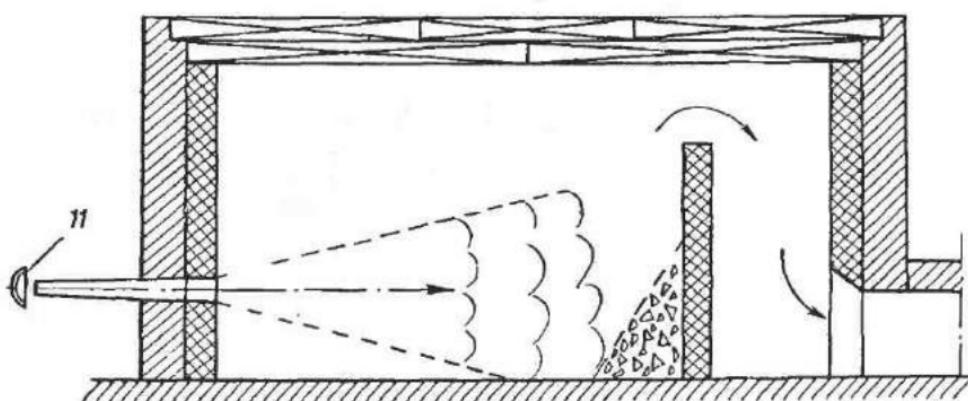
На рис. 108, *a* показана половина сдвоенной полугазовой топки шириной 3000 мм (Гипродрев) для сырого кускового топлива. Она имеет два загрузочных отверстия 5, почти вертикальную под ними подовую часть в камере горения, раздробляющие поток газа сводики 4, между которыми подается вторичный воздух 3. За топочной камерой в общем с нею каркасе установлены три последовательных вертикальных канала с перевальных стенками, при прохождении которых продукты сгорания изменяют направление на 180°. Это способствует их перемешиванию при догорании и выпадению искр. Топка футерована изнутри огнеупорным кирпичом, свод двойной: нижний из огнеупорного кирпича, верхний из красного. Разрежение в задней части топки поддерживается 20—50 Па (2—5 мм вод. ст.).

Проектную производительность топки определяют по тепловому напряжению зеркала горения и объему топочной камеры. Тепловое напряжение зеркала горения при сыром топливе принимают 350 кВт/м² [(300 Мкал/(м²·ч))], а при полусухом — 470 кВт/м² [(400 Мкал/м²·ч)], что соответствует сжиганию около 150 кг/м² древесного топлива в час. Напряжение топочного пространства принимают 290—350 кВт/м³ [250—300 Мкал/(м³·ч)]; при сыром топливе это соответствует его расходу 120 кг/м³ в час. В топке, показанной на рис. 108, *a* сжигается 800—1200, а в двойной — до 2400 кг топлива в час, что обеспечивает теплом десять туннелей (см. рис. 105).

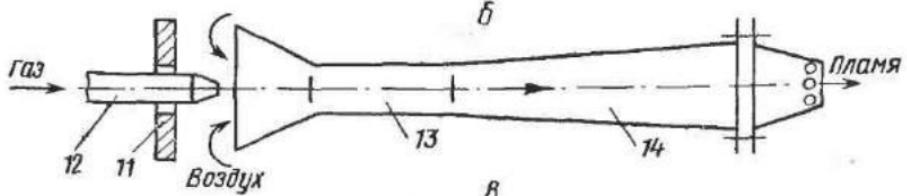
Удельный расход топлива 15—20% от объема высушенных шиломатериалов летом меньше, поэтому важно использовать в топке как можно больше топлива. Для этого при работе топки приоткрывают поддувальные заслонки и через три дополнительные дверки 6 (см. рис. 108, *a*) над сводиками 4 добавляют воздух, поддерживая загрузочную часть топки все время заполненной топливом.



a



b



c

Рис. 108. Топки и инжекционная горелка:

a — полугазовая топка для дробленых древесных отходов; *b* — подтопок для сжигания природного газа; *c* — инжекционная горелка; 1 — поддувальная заслонка; 2 — каркас топки; 3 — канал вторичного воздуха (подача между сводиками); 4 — сводики; 5 — загрузочное отверстие; 6 — заслонка вторичного воздуха; 7 — защитный скользящий экран; 8 — растопочная труба; 9 — рукоятка шибера растопочной трубы; 10 — главный шибер; 11 — шайба, регулирующая подачу воздуха в горелку; 12 — газовое сопло; 13 — смеситель; 14 — диффузор

Кладку топки скрепляют металлическим каркасом, предназначенным главным образом для восприятия распоров сводов. Каркас ставят при закладке фундамента топки. Своды выполняют только из клинового кирпича, который может быть подготовлен на месте путем обтирки на точильном кругу (а не отески). Кирпичи свода кладут впритирку с толщиной швов до 1 мм. Распорные горизонтальные балки свода не привариваются к стойкам каркаса. Газоходы выполняют из хорошо обожженного красного кирпича впритирку, на сплошных швах (а не в пустошовку).

Основной недостаток задней части топки, шиберов, газоходов — негерметичность, способствующая подсосу воздуха, поэтому газоходы обкладывают слоем из тощей глины или, лучше, заключают в тонкостенную металлическую трубу и утепляют по всему периметру просеянным шлаком; на шиберах ставят герметизирующие колпаки с отверстием для штока.

Чугунную рамку и шибер на газоходе и на растопочной трубе во избежание защемления (вследствие коробления) выполняют без пазов; шибер перемещается по гладкой, выверенной на плоскости стенке рамки, установленной слегка наклонно. Шибера и их рамки — чугунные, предпочтительнее керамические (стальные не допускаются). Иногда их набирают из огнеупорных кирпичей.

Топки и калориферы боровых камер

В боровых камерах (см. рис. 96) устраивают маленькие индивидуальные топки, питающие горячими продуктами сгорания огневые калориферы камер (рис. 109).

Расход некрупного кускового топлива 50—75 кг/ч. Таким образом, поверхность зеркала горения топки должна быть около $75/150=0,5 \text{ м}^2$ (длина 0,8 и ширина 0,63). Сбоку устраивают люк.

Огневые калориферы могут быть разной конструкции. Важно, чтобы наружу удалялся газ, охладившийся вследствие теплопередачи в борове. Сечение борова принимают удлиненное по высоте; газ отбирается из нижней части. В кладке борова не должно быть неплотностей — кирпичи укладывают впритирку на сплошных швах глиняного раствора.

Наиболее прост по конструкции кирпичный калорифер прямоугольного сечения без свода; внутренняя ширина его до 0,27 м (рис. 109, а, в, г). Недостатки этого калорифера — непрочность и возможные неплотности. Для придания устойчивости стенкам калориферов их выкладывают слегка наклонными внутрь; поперечное сечение калорифера будет в этом случае трапециевидным (рис. 109, б). Установка вертикальных перегородок 1 (рис. 109, а), задерживающих нагретый газ, повышает использование теплоты. При этом сопротивление калори-

фера несколько возрастает, следовательно, высота дымовой трубы должна быть большей. У колпаковых калориферов (рис. 109, в) повышают также поверхность нагрева и одновременно перераспределяют в желательном направлении теплоотдачу по длине.

Толщину стенок калорифера обычно уменьшают по пути движения в нем газов; как правило, ее принимают в 1, $\frac{3}{4}$ и $\frac{1}{2}$ кирпича. Последний ход часто выполняют из сдвоенных по высоте металлических труб диаметром 300—400 мм, с парал-

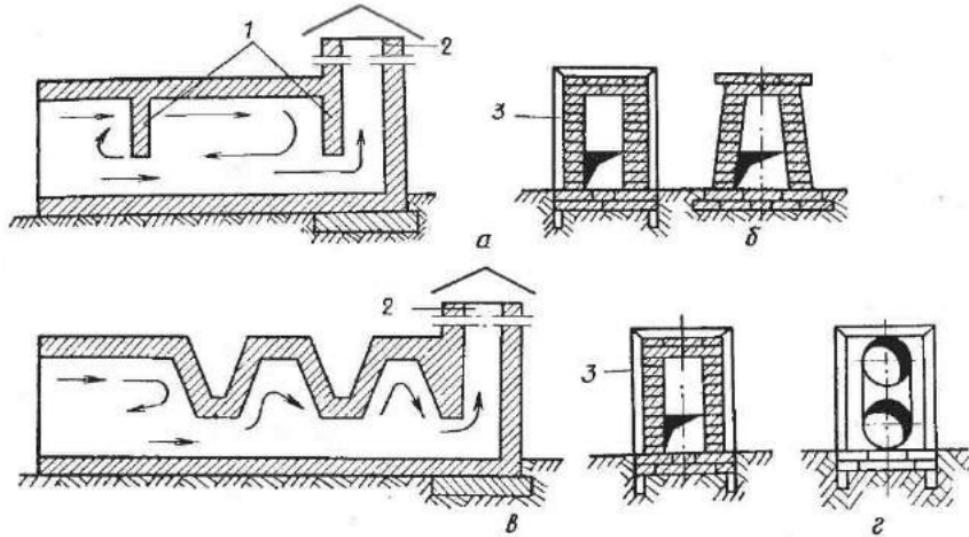


Рис. 109. Огневые калориферы:

а — прямоугольного сечения; *б* — трапециевидного сечения; *в* — колпаковый; *г* — из круглых труб (верхняя выхлопная конец примыкает к нижней); 1 — подпорные стенки; 2 — дымовая труба; 3 — обвязка калорифера

ельным движением в них газа, но отбором его из нижней трубы (рис. 109, г).

Температура вступающих в калорифер газов около 600—800° С, а перед дымовой трубой примерно 200—300° С. Высота трубы 10—12 м. Для усиления тяги на дымовую трубу рекомендуется поставить дефлектор (типа ЦАГИ).

Скорость газа в калорифере принимают 1,5—3 м/с, в дымовой трубе 3—4 м/с. При малых скоростях газа трубу будет задувать ветер и в ней начнет скапливаться сажа, при больших — возрастет ее сопротивление. Скорость газов может быть установлена в зависимости от количества сжигаемого древесного топлива различной влажности с помощью диаграммы (рис. 110). Подсос в топку и газоходы излишнего холодного воздуха нежелателен, так как понижает температуру и увеличивает объем газа, который практически будет равен сумме объемов компонентов до смешивания.

Для ориентировочного определения тепломощности огневого калорифера можно считать, что при средней разности температур внутри и снаружи него $400^\circ - 50^\circ = 350^\circ \text{С}$ и толщине стенки в $\frac{3}{4}$ кирпича он отдает $1160 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [$1000 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$] тепла, а в $\frac{1}{2}$ кирпича — $1400 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [$1200 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$]. При сжигании сухого топлива теплопередача увеличится.

В формуле теплопередачи (для однослоиной стенки толщиной b , м)

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (218)$$

общее термическое сопротивление $1/k$ состоит из термического сопротивления внутренней поверхности $1/\alpha_1$, термического со-

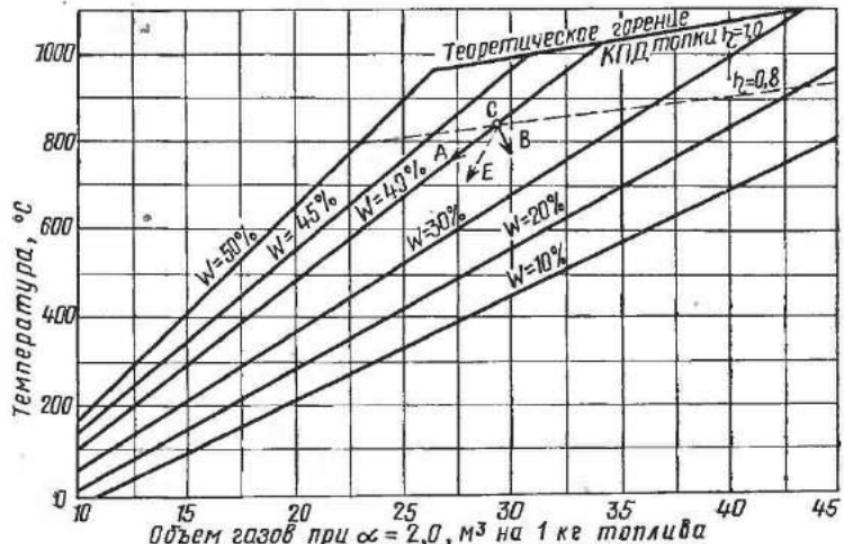


Рис. 110. Объем продуктов сгорания 1 кг древесного топлива при $\alpha=2,0$:

A — вектор охлаждения газов стенками калорифера; B — вектор подсасывания холодного воздуха; E — равнодействующий вектор снижения температуры и объема газов для точки C

противления толщины самой стенки b/λ (λ — коэффициент теплопроводности; для кирпича в 65 раз меньше чем для стали) и термического сопротивления $1/\alpha_2$ наружной поверхности калорифера. В ориентировочных подсчетах при стенах толщиной $1, \frac{3}{4}$ и $\frac{1}{2}$ кирпича и конвективном теплообмене значение $1/k$ можно принять соответственно $0,58; 0,46$ и $0,35 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ($0,5; 0,4$ и $0,3 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}^{-1} \text{ С}/\text{ккал}$).

В огневом кирпичном калорифере большое термическое сопротивление оказывает толща кирпичной стенки b/λ , при ее толщине в $\frac{1}{2}$ кирпича $b/\lambda = 63\%$, в 1 кирпич — 75% ; наименьшее термическое сопротивление оказывает внутренняя поверхность стенки — соответственно 13 и 8% (если она не покрыта золой или сажей) от всего термического сопротивления стенки.

На долю наружной поверхности приходится соответственно 24 и 17%. Таким образом, желательно обдувать наружную поверхность калорифера.

Для металлического участка калорифера из расчетов выпадает средний член в (218), поэтому термическое сопротивление снижается в несколько раз; повышается теплопередача и тепловой КПД калорифера, но ухудшается тяга дымовой трубы. При проектировании калорифера необходимо предусмотреть внутреннюю очистку от золы и сажи.

58. ПАРОВЫЕ КАЛОРИФЕРЫ

Чугунные ребристые трубы

В паровых металлических калориферах при малой b и очень большом α величина b/λ приближается к нулю, так же как и $1/\alpha_1$ для пара. При этом $k \approx \alpha_2$, т. е. при обогреве насыщенным паром, теплопередача калорифера целиком зависит от внешних условий (состояния внешней поверхности, скорости ее обдувания и т. д.).

В паровых лесосушильных установках калориферы обычно собирают из двухметровых ребристых труб (ГОСТ 1816—76) с диаметром ребер 175 мм, фланцев 160 мм, наружным диаметром труб 84 мм, массой 68 кг и площадью поверхности нагрева 4 м².

Калориферы монтируют по различным схемам. Необходимо, чтобы была равномерная отдача тепла по длине камеры. При настенном монтаже (см. рис. 93, 95 и др.) ведут параллельно группы труб (3—6 шт.) от дверей к заднему концу камеры, а затем поворачивают назад, т. е. к дверям; при этом строго соблюдают непрерывность уклона труб (около 0,5—1%) по ходу пара. В случае несоблюдения беспрерывного уклона ребристых и отводящих труб часть калорифера может быть залита конденсатом и выключится. К последней ребристой трубе отводную трубку подключают в нижней части фланца для беспрепятственного стока конденсата из калорифера (рис. 111, а). Трубы меньше засоряются, если межреберные приливы расположены в вертикальной плоскости (рис. 111, б).

Допускаемое давление пара в калорифере 0,6 МПа (6 кгс/см²). Положительные особенности чугунных ребристых труб — стойкость против коррозии, слабая засоряемость, небольшое сопротивление прохождению воздуха. Их недостатки — значительная масса, громоздкость, повышенная стоимость монтажа.

Требуемую площадь поверхности нагрева F (м²) калорифера определяют по формуле

$$F = Qc/[k(t_n - t)], \quad (219)$$

где Q — количество тепла, которое должен передать калорифер; t_p — средняя температура теплоносителя (греющего пара, воды); t — средняя температура нагреваемого воздуха; c — коэффициент запаса, принимаемый 1,1—1,3 (больше для пластинчатых калориферов).

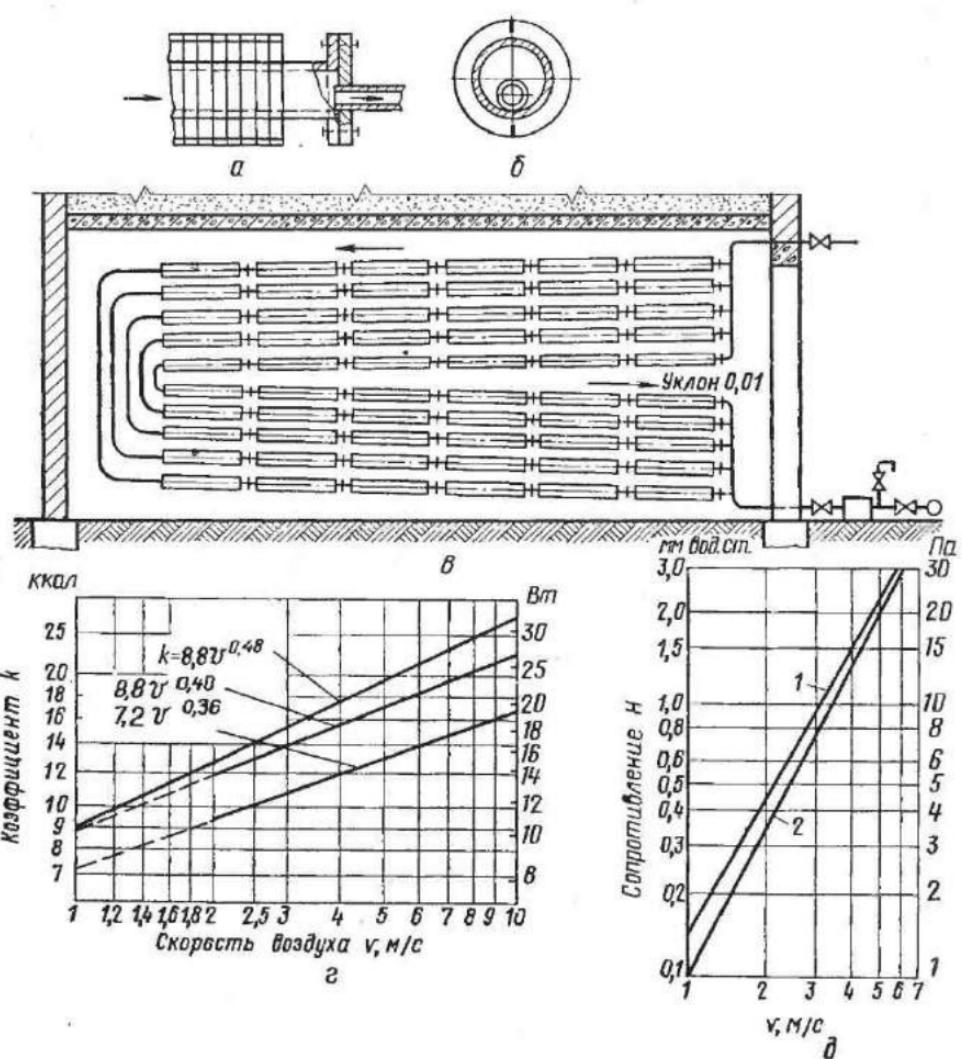


Рис. 111. Калорифер из круглых ребристых труб:

а — схема отвода конденсата из последней трубы; б — расположение межреберных приливов; в — настенный калорифер в сушильной камере; г — коэффициент теплопередачи ребристых труб; д — сопротивление движению воздуха: 1 — шахматное расположение труб; 2 — последовательное расположение труб

При естественной циркуляции воздуха для круглой чугунной ребристой трубы коэффициент теплопередачи k выражается формулой

$$k = 1,163(t_n - t)^{0.4} \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К}]\text{ =} \\ = (t_n - t)^{0.4} \text{ [ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {^\circ}\text{C})]. \quad (220)$$

По этой формуле при известной разности $t_n - t$ — определим k :

$t_n - t, {^\circ}\text{C} \dots$	100	90	80	70	60	50	40	30
$k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \dots$	7,2	7,0	6,8	6,4	6,1	5,6	5,1	4,5
$k, \text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \times {^\circ}\text{C}) \dots$	6,2	6,0	5,8	5,5	5,2	4,8	4,4	3,9

При побудительной циркуляции k зависит от средней приведенной к нулевой температуре скорости v воздуха между ребрами:

$$v = v' \rho / 1,3, \quad (221)$$

где v' — действительная скорость воздуха, м/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³; 1,3 — плотность воздуха при $t=0^\circ\text{C}$ и давлении 101 325 Па (760 мм рт. ст.).

При последовательной по ходу воздуха установке рядов труб

$$k = 10,2v^{0.4} \text{ [Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 8,8v^{0.4} \text{ [ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {^\circ}\text{C})]; \quad (222)$$

при шахматной установке труб

$$k = 10,2v^{0.48} \text{ [Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 8,8v^{0.48} \text{ [ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {^\circ}\text{C})]; \quad (223)$$

для одиночной трубы

$$k = 8,4v^{0.36} \text{ [Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 7,2v^{0.36} \text{ [ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {^\circ}\text{C})]. \quad (224)$$

На рис. 111, г дан график для определения коэффициента теплопередачи k , а на рис. 111, д — сопротивление H прохождению воздуха, отнесенное к одному ряду труб, по пути его движения.

Пластинчатые калориферы

Пластинчатый калорифер — компактный теплообменный агрегат значительной теплomoщности. Он состоит из нескольких рядов параллельных трубок, объединенных на каждом их конце общей коробкой для подвода в трубы свежего и отвода отработанного теплоносителя. На трубы напрессованы пластиинки толщиной 0,5 мм с шагом в свету 5 мм. Пластиинки нагреваются от трубок и передают тепло воздуху, принудительно продуваемому между пластиинками, т. е. перпендикулярно трубкам (рис. 112).

В зависимости от температурного критерия Θ , представляющего отношение разности температур воздуха после и до калорифера к средней разности температур теплоносителя и воздуха, калориферы подразделяются на пять моделей со следующими значениями Θ и величинами аэродинамических сопротивлений H , Па (мм вод. ст.), при $t=0^\circ\text{C}$ и $p=101\,325$ Па

0	0,18	0,29	0,46	0,73	1,17
H	6 — 15	9,4 — 24	15 — 38	24 — 61	38 — 97

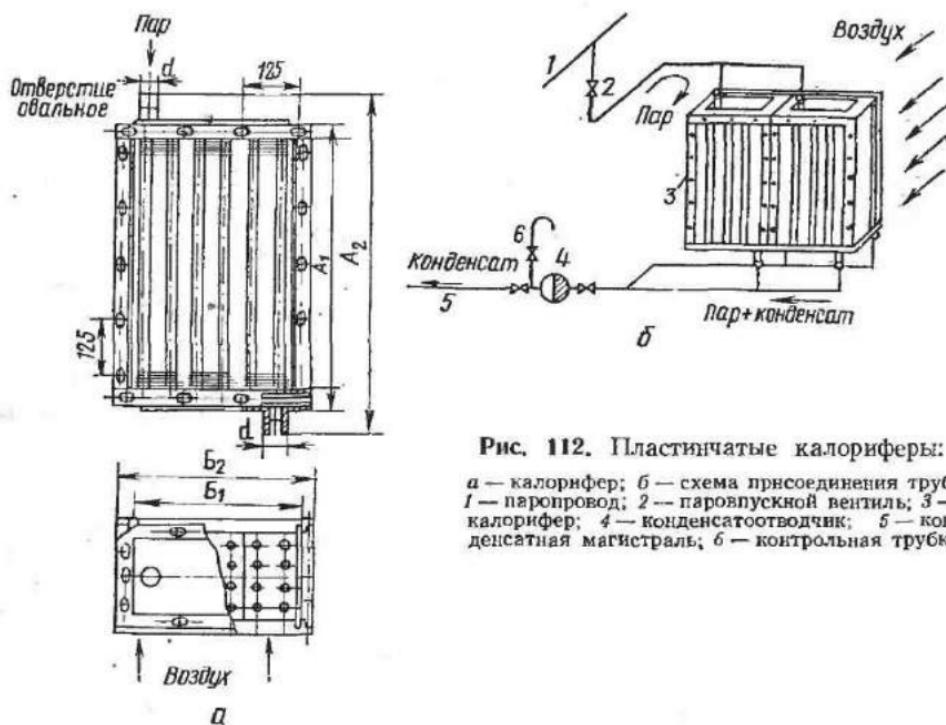


Рис. 112. Пластичные калориферы:
а — калорифер; б — схема присоединения труб:
1 — паропровод; 2 — паровпускной вентиль; 3 — калорифер; 4 — конденсатоотводчик; 5 — конденсатная магистраль; 6 — контрольная трубка

Самая малая модель СМ, малая — М, средняя — С, большая — Б и самая большая — СБ. Каждая модель имеет 12 номеров-типоразмеров: по высоте (размер A_1 на рис. 112, а) № 1 и 6 — 578 мм, № 2 и 7 — 703 мм, № 3 и 8 — 828 мм, № 4 и 9 — 953 мм, № 5 и 10 — 1203 мм, № 11 и 12 — 1703 мм; по ширине (размер B_1 на рис. 112, а) № 1—5 — 426 мм, № 6—10 — 551 мм, № 11 — 1051 мм и № 12 — 1551 мм.

Изготавливают модифицированные модели калориферов КФС (ГОСТ 7201—70) в виде моделей КВБ, КВС и др. Технические характеристики калориферов КВБ приведены в табл. 18. В табл. 19 дана величина их коэффициента теплопередачи k и сопротивления H прохождению воздуха в функции от его массовой скорости v_p .

18. Технические характеристики пластинчатых калориферов КВБ

№ калори- фа	Площадь поверх- ности нагрева, м ²	Площадь живого сечения воздуха, м ²	Присоединительные размеры, мм (см. рис. 112)				Диаметр патрубков <i>d</i> , дюймы	Масса, кг
			<i>A</i> ₂	<i>B</i> ₂	<i>A</i> ₁	<i>B</i> ₁		
2	9,9	0,115	760	412	624	390	1 1/4	53
3	13,2	0,154	780	532	624	510	1 1/2	69
4	16,7	0,195	930	532	774	510	1 1/2	85
5	20,9	0,244	930	662	774	640	2	106
6	25,3	0,295	1080	662	924	640	2	125
7	30,4	0,354	1100	782	924	760	2 1/2	152
8	35,9	0,416	1250	782	1074	760	2 1/2	174
9	41,6	0,486	1250	902	1074	880	2 1/2	201
10	47,8	0,588	1400	902	1224	880	2 1/2	224

19. Коэффициенты теплоотдачи при теплоносителе — паре и сопротивления проходу воздуха калориферов КВБ

Массовая скорость воздуха <i>v_p</i> , кг/(м ² · с)	Коэффициенты теплопередачи, <i>K</i> , Вт/(м ² · K) [ккал/(м ² · ч · °C)]	Сопротивле- ния кало- риферов проходу воз- духа, Па (мм вод. ст.)	Массовая скорость воздуха <i>v_p</i> , кг/м ² · с	Коэффициенты теплопередачи <i>K</i> , Вт/(м ² · K) [ккал/(м ² · ч · °C)]	Сопротивле- ния кало- риферов проходу воз- духа, Па (мм вод. ст.)
2	22,8 [19,6]	5 (05)	10	39,8 [34,2]	75 (7,5)
3	26,3 [22,6]	10 (1,0)	11	41,1 [35,3]	88 (8,8)
4	29,0 [24,9]	16 (1,6)	12	42,7 [36,7]	102 (10,2)
5	31,4 [27,0]	23 (2,3)	13	44,0 [37,8]	113 (11,3)
6	33,3 [28,6]	32 (3,2)	14	45,0 [38,7]	132 (13,2)
7	35,0 [30,1]	41 (4,1)	15	46,0 [39,6]	150 (15,0)
8	36,8 [31,6]	51 (5,1)	16	47,0 [40,3]	168 (16,8)
9	38,4 [33,0]	63 (6,3)			

Пластинчатые калориферы применяют лишь для сушки хвойных пиломатериалов и устанавливают наверху камер или туннелей. При проведении влаготеплообработки материала калориферы из обычной стали портятся.

Сопротивление калориферов прохождению воздуха, подаваемого в лесосушильные камеры в очень больших объемах с малой величиной его подогрева (на 2—5° С), должно быть минимальным — не более 20 Па (2 мм вод. ст.), поэтому применяют обводы воздуха и выбирают калорифер с малой вели-

чиной Θ . Этим условиям соответствует калорифер самой малой ($\Theta=0,18$) модели, с небольшой его протяженностью по ходу воздуха, без смешения трубок (тип КФ) и без рифления пластинок, к тому же способствующих их засорению древесной пылью.

В туннелях воздух подогревают на 20—30° С, поэтому Θ 0,5—0,7, чему соответствуют калориферы средней и большой моделей.

Калориферы КВС, КВБ, КФСО (К — калорифер, В — теплоноситель вода или пар, Ф — пар, С и Б — средняя или большая модель — О — оребренные, т. е. спирально-навивные) не вполне отвечают условиям применения в сушильных камерах и туннелях. Так, смешение трубок на 0,5 их диаметра хотя и повышает на 10% теплопередачу, однако увеличивает сопротивление воздуха. Последний параметр (с учетом надежности работы) — определяющий для камер. Цена калорифера небольшая (50—100 р.), но стоимость расходуемой электроэнергии значительная.

С применением высокотемпературных теплоносителей снижается величина Θ , уменьшится модель, следовательно, сопротивление калорифера и сушильная установка будут эффективнее в аэродинамическом отношении.

59. КОНДЕНСАТООТВОДЧИКИ

В калорифере, отдающем тепло для нагревания воздуха, конденсируется соответствующее количество пара. В то же время в калорифер беспрерывно подается пар из паромагистрали, а из него должно вытекать такое же (по массе) количество конденсата. Пар должен находиться в калорифере под давлением, чтобы его температура была выше 100° С.

Возникает необходимость автоматически удалять из калорифера конденсат, но задерживать в нем пар. Для отделения конденсата от пара применяют конденсатоотводчики, из которых конденсат поступает в конденсатную магистраль, а затем обычно направляется в котельную (см. рис. 18, б). Таким образом, конденсатоотводчик является сепаратором, а не конденсатором. Существуют разнообразные конструкции конденсатоотводчиков: гидростатические (поплавковые), дроссельные, термодинамические, лабиринтные и др. Остановимся на основных, используемых в лесосушильных установках.

Широко применяют гидростатические конденсатоотводчики с открытым поплавком, часто называемые конденсационными горшками, а также термодинамические конденсатоотводчики.

На рис. 113, а показан конденсатоотводчик КГ с открытым поплавком. Конденсат стекает из калорифера в чугунный корпус 7 конденсатоотводчика; поплавок 6 при этом вслывает и закрывает находящееся в крышки отверстие 1 золотником,

который находится на верхнем конце стержня 5, прикрепленного к дну поплавка. Накапливающаяся в корпусе вода начинает переливаться в поплавок, который через некоторое время опускается (тонет в воде) и открывает отверстие 1. Через это отверстие паром, находящимся под избыточным давлением, конденсат по трубе 4 выдавливается вверх из поплавка, и он всплывает, закрывая отверстие. Таким образом, конденсатоотводчик работает прерывисто.

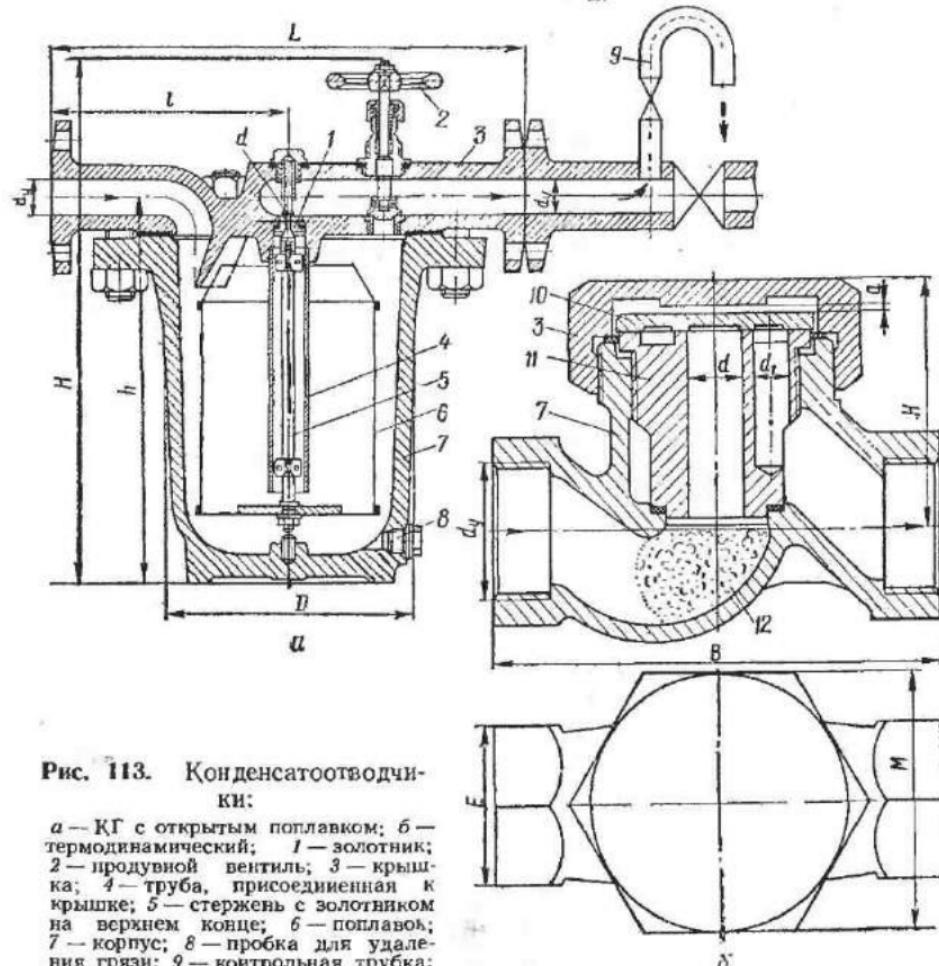


Рис. 113. Конденсатоотводчики:

a — КГ с открытым поплавком; *b* — термодинамический; 1 — золотник; 2 — продувной вентиль; 3 — крышка; 4 — труба, присоединенная к крышке; 5 — стержень с золотником на верхнем конце; 6 — поплавок; 7 — корпус; 8 — пробка для удаления грязи; 9 — контрольная трубка; 10 — тарелка; 11 — седло; 12 — сетка

Первый признак неисправности конденсатоотводчиков — выход пара из сборного бака и «кипение» в нем конденсата. Основные причины выхода из строя конденсатоотводчиков с открытым поплавком следующие: неисправность обводного вентиля, износ узла золотника, бездействие поплавка из-за наклонной установки корпуса, образование неплотности (проржавление) в поплавке, скопление под ним грязи и др.

Источником больших потерь пара может быть обводная труба, устраиваемая сбоку, в обход конденсатоотводчика, и предназначенная для спуска конденсата в начале процесса или продувки паропровода. Так как конденсатоотводчик снабжен продувным вентилем (рис. 113, а, 2), не рекомендуется устраивать обводные трубы. Ремонтируют и меняют конденсатоотводчик при остановке сушильной камеры.

Для проверки исправности конденсатоотводчика необходимо устраивать за ним (по ходу конденсата) контрольную трубку 9, позволяющую временно выпускать конденсат в атмосферу (пунктирная стрелка), если закрыть вентиль далее на конденсатной трубе и открыть вентиль на контрольной трубке. У исправного конденсатоотводчика будет прерывистый (через каждые 10—60 с) выброс из трубки конденсата вместе с паром. Пар образуется при вторичном вскипании конденсата с температурой выше 100° С и давлением выше 10⁵ Па (1 бар) в момент снижения давления в отверстии 1 конденсатоотводчика. Пользуясь контрольной трубкой, легко определить по массе вытекающего конденсата часовой расход пара, поступающего в калорифер.

Термодинамический конденсатоотводчик во много раз компактнее и свободен от недостатков по сравнению с поплавковым (рис. 113, б). Он состоит из корпуса 7, крышки 3, тарелки 10, седла 11 и свернутой в клубок тонкой медной сетки 12, предотвращающей прибор от засорения. Рабочей деталью является подвижная тарелка 10. При своем прохождении конденсат приподнимает тарелку и свободно поступает к выходному отверстию седла. Если движется пар, скорость которого во много раз выше, чем скорость конденсата, под тарелкой вследствие динамического действия струи статическое давление понижается, тарелка прижимается к седлу и проход пара прекращается. Прибор снабжается сменными седлами с отверстиями различных диаметров (на разную производительность).

Технические характеристики поплавкового КГ и термодинамического конденсатоотводчиков приведены в табл. 20 и 21.

Дроссельный конденсатоотводчик. Если отходящую от калорифера трубу закрыть шайбой с небольшим отверстием, называемой подпорной, при определенном сечении этого отверстия через него будет проходить только конденсат. Скорость его истечения v определим по формуле (206). Выражая динамическое давление в 0,1 МПа (1 кгс/см²), т. е. в 100 000 раз большей величиной, а плотность воды в тоннах на кубический метр, в 1000 раз большим значением, получим

$$v = 1,41 \sqrt{100(p_1 - p_2)}. \quad (225)$$

Приняв коэффициент истечения конденсата $\mu = 0,8$, напишем

$$v = 0,8 \cdot 1,41 \cdot 10 \sqrt{p_1 - p_2} = 11,2 \sqrt{p_1 - p_2}. \quad (226)$$

20. Технические характеристики поплавковых конденсатоотводчиков

Марка конденсато- отводчика	Расход, кг/ч	Условный прокол d_y , мм	Масса, кг	Размеры по рис. 113, а, мм					
				L	t	H	h	D	d
КГ-15-16-06	150	15	19	275	137	278	188	126	1,5
КГ-20-16-06	250	20	32	320	160	303	209	160	2,0
КГ-25-16-06	400	25	40	355	177	380	260	178	2,5
КГ-32-16-06	900	32	65	420	210	475	340	221	3,6
КГ-50-16-06	2850	50	136	550	275	632	484	330	6,5

21. Техническая характеристика термодинамического конденсатоотводчика Р76001-01

Условный прокол d_y , мм	Расход, л/ч, при избыточном давлении пара в калорифере, 0,1 МПа (1 кгс/см ²)					Масса, кг	Размеры по рис. 113, б, мм					
	0,5 (0,5)	1 (1)	2 (2)	3 (3)	4 (4)		B	H	M	E	a	d_1
15	120	140	170	184	214	0,9	80	55	55	30	2,0	8,5
20	200	280	375	415	470	1,0	100	61	60	36	2,0	10
25	390	460	585	670	730	1,7	120	68	65	46	2,0	12
32	450	678	725	872	970	1,8	140	79	85	55	2,5	17
40	500	700	790	910	1035	3,6	170	94	95	60	3,5	20
50	750	1150	1420	1710	1800	5,3	200	110	105	75	4,0	26

Так как при круглом отверстии расход конденсата $Q = 0,785d^2v$, принимая v в метрах в секунду, а d — в миллиметрах, получим часовое количество протекающего конденсата, кг/ч:

$$L = 0,785d^2v \cdot 3600 / 1000 = 2,82d^2v = 32d^2(p_1 - p_2). \quad (227)$$

Диаметр отверстия шайбы в паровых камерах при одном конденсатоотводчике примерно 1,5—2 мм, а в туннелях — 2,5—3 мм. Подпорная шайба исключает чрезмерные потери пара при неисправном поплавковом конденсатоотводчике. Кроме того, если диаметр шайбы подобран правильно, а сама она хорошо смонтирована, можно также использовать часть физической теплоты конденсата, охлаждая его на последнем участке калорифера (перед шайбой) ниже температуры пара, поступающего в калорифер.

Даже при некоторой неточности в подборе шайбы через ее отверстие несколько излишнего сечения пройдет не много пара, так как его объем в несколько сот раз больше объема воды равной массы. Перед шайбой ставят грязевик (с пробкой).

Подпорные шайбы применяют в сушильных камерах, дыхательных прессах и т. д. при сравнительно постоянном расходе тепла. Шайбу можно регулировать (по показанию открываемого контрольного крана) переменным ввинчиванием в отверстие конца конусной иглы, управляемой извне [42].

Через конденсатоотводчик может утекать из калорифера некоторое количество пара. Для выявления потерь тепла с утекающим паром и установления степени его использования проводят *калориметрирование конденсата*. При этом одновременно проверяют исправность конденсатоотводчика. Контрольную трубку 9 конденсатоотводчика (см. рис. 113, а) соединяют на некоторое время с холодной водой, находящейся в небольшом баке, и через короткий теплоизолированный шланг пускают в него конденсат. Замерив температуру t_1 и t_2 , массу G_1 и G_2 воды в баке до и после добавки в него конденсата, вычисляют энталпию i_k (кДж) 1 кг смеси конденсата с паром по формуле

$$i_k = 4,19 (G_2 t_2 - G_1 t_1) / (G_2 - G_1). \quad (228)$$

На 1 кг пароводяной смеси с температурой t_n калорифер теряет следующее относительное количество пара n , уходящего через конденсатоотводчик:

$$n = (i_k - 4,19 t_n) / (i_n - 4,19 t_n). \quad (229)$$

Так, если энталпия конденсата вместе с паром $i_k = 755$ кДж/кг (180 ккал/кг), а при давлении пара в калорифере 0,4 МПа (4 кгс/см²) $i_n = 2740$ кДж/кг (654 ккал/кг) и $t_n = 143^\circ\text{C}$, относительная потеря тепла n с утекающим из калорифера паром равна $(755 - 4,19 \cdot 143) / (2740 - 4,19 \cdot 143) = 0,072$, т. е. теплота пара используется на 92,8% (без учета теплоты горячего конденсата). С учетом теплоты конденсата относительная потеря тепла n в этом случае

$$\begin{aligned} n &= (i_k - 4,19 \cdot 20) / (i_n - 4,19 \cdot 20) = \\ &= (755 - 4,19 \cdot 20) / (2740 - 4,19 \cdot 20) = 0,252, \end{aligned}$$

где 20 — температура воды, поступающей в котельную в летнее время, $^\circ\text{C}$.

Паровыми сушильными установками в обычных условиях с конденсатом теряется около четвертой части теплоты пара, а если конденсатоотводчик неисправен, значительно больше.

Отсюда следует существенный вывод о преимуществах водяного обогрева, в первую очередь в сушильных туннелях. Одна-

ко большая эффективность достигается с применением в них в качестве теплоносителя (одновременно и сушильного агента, т. е. без преобразований тепла), продуктов сгорания, получаемых от любого вида топлива, наиболее приемлемого по местным условиям.

60. ЭЛЕКТРОКАЛОРИФЕРЫ

Для нагревания воздуха в небольших сушильных камерах используют промышленную электроэнергию (рис. 91, б и 99, б, в). В качестве греющих элементов известны различные конструкции трубчатых электронагревателей (ТЭНов) разного оформления и мощности. Нагреватель состоит из U-образно или более сложно изогнутой трубы диаметром 10—16 мм, длиной в развернутом виде 1—2,5 м, в слое электроизоляции которой запрессована никромовая греющая проволока диаметром 0,3—0,5 мм и длиной 8—17 м. Габаритные размеры ТЭНов: длина 0,5—1 м, ширина 50—120 мм, толщина (у места подключения к электросети) около 20 мм; масса 1—2,5 кг (рис. 114, а). Таким образом, ТЭН — очень компактный нагреватель. Температура на его поверхности 300—550° С; она понижается с усилением обдувания нагревателя воздухом при сохранении почти постоянной его теплоотдачи.

Разработаны также ТЭНы — нагреватели воды в открытых и закрытых баках для получения пара атмосферного давления. Это применимо для влаготеплообработки высушиваемой в камере древесины и конечного ее кондиционирования.

ТЭНы мощностью 0,4—5 кВт для нагревания воздуха и мощностью 0,3—5 кВт для нагревания воды изготавливают предприятия электротехнической промышленности (нагреватели воды обозначают НВ). На рис. 114, а в виде примера показаны два различных ТЭНа: размер А — габаритная длина (200—600 мм), Б — активная длина (150—550 мм) и В — ширина.

На основе оребренных ТЭНов мощностью по 1,66 кВт изготавливают компактные электрокалориферы ОКБ-3083, ОКБ-3084 и ОКБ-3085 мощностью 20, 40 и 100 кВт, 380 В. Их габаритная ширина по 1060 мм, высота по 660 мм и длина по ходу воздуха 265, 415 и 415 мм; масса 98, 158 и 250 кг. Количество воздуха, подогреваемого на 30° С соответственно 3700, 7400 и 18500 м³/ч.

В лесосушильных камерах можно применять отопительные электрокалориферы СФО мощностью от 16 до 250 кВт, 380 В, предназначенные для нагрева воздуха до 100° С в системах воздушного отопления, вентиляции, искусственного климата и сушильных установках (табл. 22). Сопротивление для прохождения воздуха — около 20 Па (2 кгс/м²). Для увеличения поверхности нагрева трубчатые элементы оребрены алюминиевой лентой. Они разделены на три самостоятельные секции.

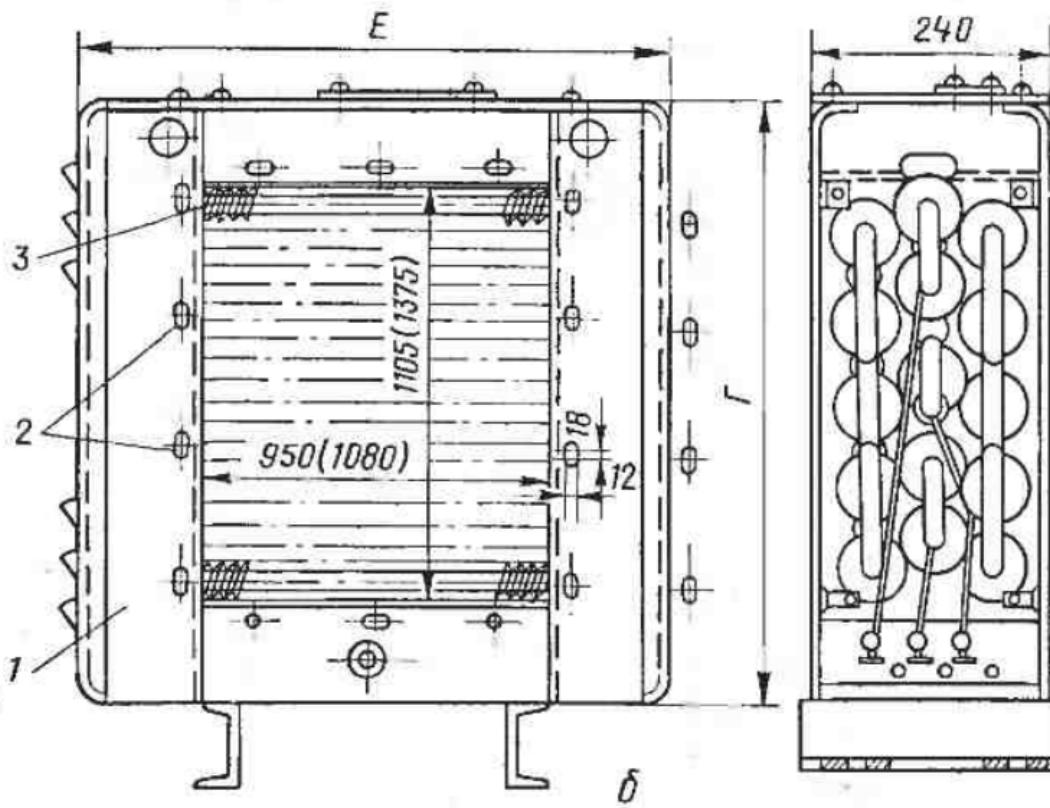
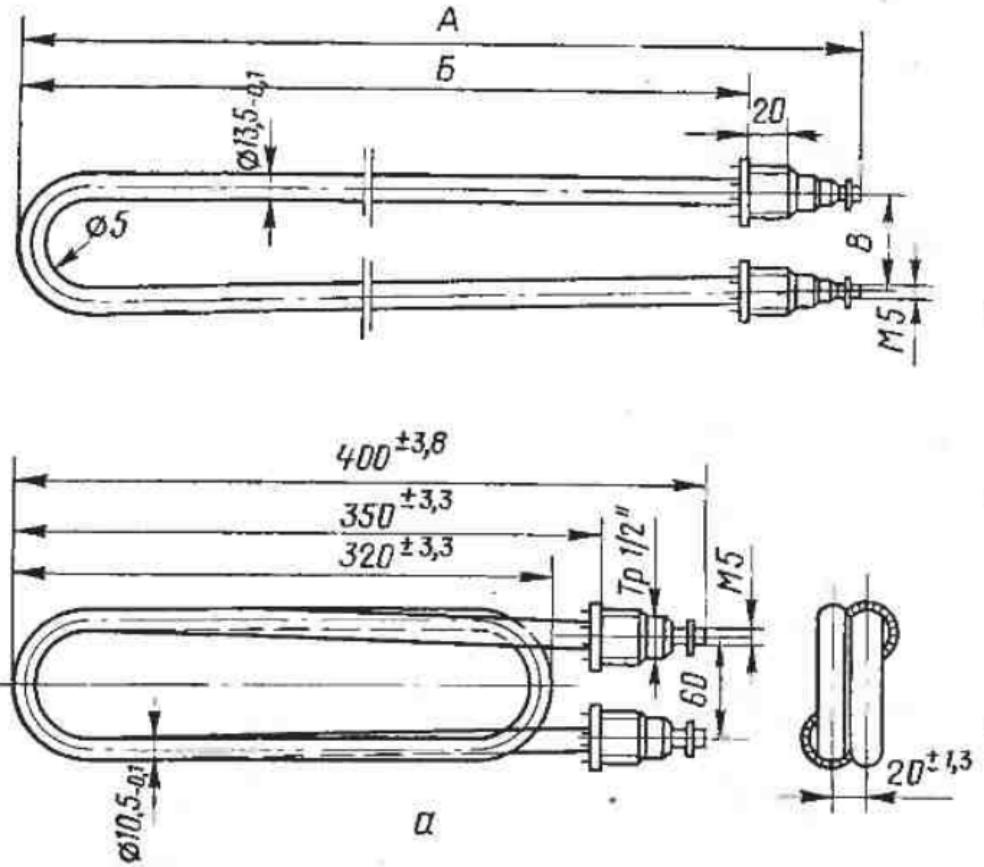


Рис. 114. Электрокалориферы:

a — трубчатый электронагреватель (ТЭН); *б* — электрокалорифер СФО: 1 — корпус; 2 — связь; 3 — трубчатый нагревательный элемент

**22. Характеристики электрических калориферов серии СФО
Наманганского трансформаторного завода**

Наименование показателей	СФО-25	СФО-40	СФО-60	СФО-100	СФО-160	СФО-250
Мощность, кВт	22,5	45	67,5	90	157	247
Площадь поверхности нагрева, м ²	6,6	12,3	18,3	27,7	51	72
Количество воздуха, кг/ч (минимальное)	1700	3400	5100	9000	13 000	19 000
Масса калорифера, кг	67	100	134	197	312	421
Ширина (габаритная) Е (см. рис. 114, б), мм	600	720	840	960	1200	1320
Высота (габаритная) Г, мм	617	767	917	1067	1367	1667

Примечание. Допустимая температура 150° С; перепад температур около 50° С.

Калорифер может работать частично, на 33, 67 и 100% от установленной мощности.

Заданную температуру нагретого воздуха поддерживают как автоматически двумя электроконтактными термометрами ЭКТ-1, датчики которых установлены на выходе воздуха из калорифера, так и в ручном режиме управления.

При первоначальном включении калорифера работают все нагревательные элементы. Если температура выходящего воздуха повышается за пределы заданной, отключается одна секция, потом вторая и т. д. С понижением температуры нагревательные элементы включаются в обратной последовательности.

Схема электрокалорифера СФО дана на рис. 114, б. Применительно к лесосушильным камерам калорифер должен быть несколько видоизменен. Его помещают после вентилятора сушильной камеры.

Существенное преимущество электрокалориферного нагревания воздуха по сравнению с аэродинамическим — независимое управление температурными и скоростными параметрами сушильного агента.

61. ВЕНТИЛЯТОРЫ

Основные сведения

По принципу действия и форме выполнения вентиляторы делятся на центробежные (радиальные) и осевые. В центробежных вентиляторах воздух перемещается от центральной

зоны к периферии между лопатками вращающегося колеса под действием центробежной силы, а в осевых — давлением лопаток, поставленных в осевом направлении наклонно к плоскости их вращения. Вентиляторы одной и той же конструкции могут быть разными по величине. Все геометрически подобные, но разные по размеру вентиляторы данной конструкции образуют тип вентиляторов.

Основной рабочий элемент вентилятора — колесо. Размеры вентилятора определяются его номером, выражющим наибольший диаметр колеса в дециметрах. Так, вентилятор № 8 имеет диаметр колеса 800 мм (8 дм). Подача вентилятора (объем подаваемого воздуха) зависит от размера, типа и частоты вращения колеса вентилятора, а также от противодавления воздушной сети (применявшийся термин «производительность» вентилятора не точен [43]). Установлены предпочтительные номера вентиляторов 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25 и т. д.

Для каждого типа вентилятора существует определенная зависимость между подачей, создаваемым давлением и окружной скоростью колеса. При прочих равных условиях подача вентилятора V не зависит от плотности ρ перемещаемого воздуха, а создаваемое давление H и потребляемая мощность N пропорциональны плотности воздуха; на холодном воздухе вентилятор более нагружен.

Подача вентилятора пропорциональна первой, а приобретаемое воздухом давление — второй степени частоты вращения; следовательно, потребляемая им мощность [см. (205)] будет пропорциональна третьей степени частоты вращения. Из-за незнания этого фактора может произойти недогрузка электродвигателей или их порча вследствие большой перегрузки при измененной частоте вращения вентиляторов.

Подача геометрически подобных вентиляторов пропорциональна третьей степени, а давление — второй степени диаметра колеса. Следовательно, мощность, необходимая для вращения вентиляторов разных размеров, но одного типа с одинаковой частотой вращения будет пропорциональна пятой степени диаметра их колеса. Указанные зависимости, приведенные обобщенно в табл. 23, справедливы для геометрически подобных вентиляторов.

По направлению вращения колеса различают вентиляторы правого (рис. 115, а) и левого (рис. 115, б) вращения. У вентилятора правого вращения колесо вращается по часовой стрелке, если смотреть со стороны всасывания, а у левого — наоборот (ГОСТ 10616—73), но обязательно — по развороту спирали кожуха.

При монтаже и эксплуатации величина зазора между колесом и обечайкой вентилятора не допускается более 1,5% радиуса колеса центробежного или длины лопатки осевого вентилятора. В противном случае резко снижается его КПД.

23. Законы подобия вентиляторов

Влияние плотности воздуха	Влияние частоты вращения	Влияние диаметра колеса	Пересчетные формулы
$V_1 = V$	$\frac{V_1}{V} = \frac{n_1}{n}$	$\frac{V_1}{V} = \left(\frac{D_1}{D}\right)^3$	$\frac{V_1}{V} = \frac{n_1}{n} \left(\frac{D_1}{D}\right)^3$
$\frac{H_1}{H} = \frac{\rho_1}{\rho}$	$\frac{H_1}{H} = \left(\frac{n_1}{n}\right)^2$	$\frac{H_1}{H} = \left(\frac{D_1}{D}\right)^2$	$\frac{H_1}{H} = \frac{\rho_1}{\rho} \left(\frac{n_1}{n}\right)^2 \left(\frac{D_1}{D}\right)^2$
$\frac{N_1}{N} = \frac{\rho_1}{\rho}$	$\frac{N_1}{N} = \left(\frac{n_1}{n}\right)^3$	$\frac{N_1}{N} = \left(\frac{D_1}{D}\right)^5$	$\frac{N_1}{N} = \frac{\rho_1}{\rho} \left(\frac{n_1}{n}\right)^3 \left(\frac{D_1}{D}\right)^5$

Примечание. Индекс 1 характеризует измененные условия; ρ — плотность воздуха; V — подача вентилятора; H — создаваемое давление; n — частота вращения; D — диаметр колеса; N — потребляемая мощность.

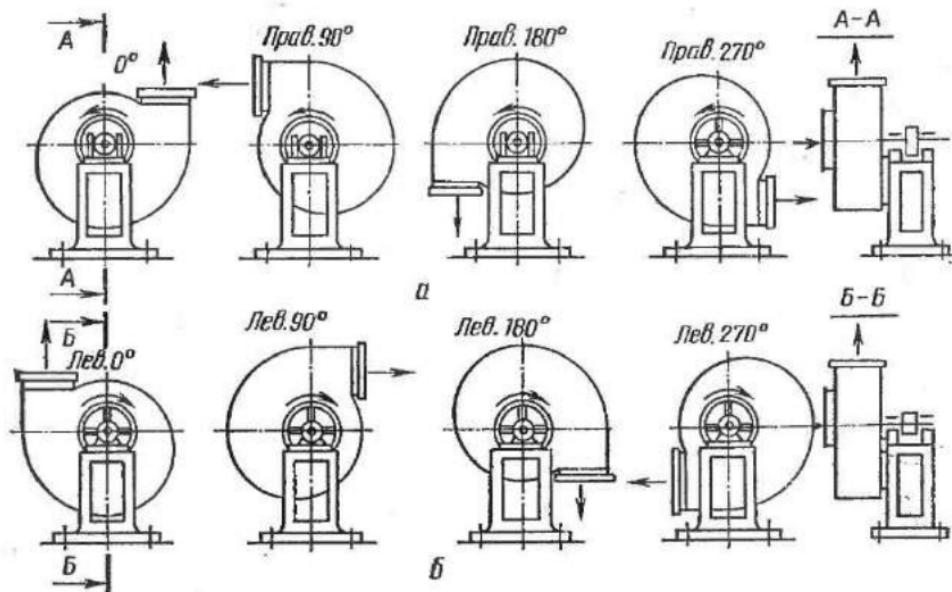


Рис. 115. Центробежные вентиляторы:
а — правого вращения; б — левого вращения

Центробежные (радиальные) вентиляторы

По направлению дутья (потока воздуха, выходящего из нагнетательного отверстия) в сушильной технике применяют вентиляторы с четырьмя направлениями дутья правого вращения и четырьмя левого (см. рис. 115).

Наиболее пригодны для лесосушильных камер вентиляторы Ц4-70 и Ц4-76 с высоким КПД (до 0,8 и соответственно 0,84). Цифра 4 в марке обозначает коэффициент давления, умноженный на 10, а цифра 70 (или 76) критерий быстроходности.

Допускаемая окружная скорость колеса для больших размеров вентилятора этих типов $u < 60$ м/с, для вентиляторов менее № 8 $u < 42$ м/с.

Эти вентиляторы используют для перемещения газообразной среды с температурой до 180° С. Вентиляторы более № 8 создают давление до 2000 Па (200 мм вод. ст.), менее № 8 до 1000 Па (100 мм вод. ст.). Вентиляторы № 10; 12,5 и 16 изготавливают также из нержавеющей стали. Они имеют 12 лопаток, слегка загнутых назад, и работают, не создавая значительного шума. Ширина кожуха равна 0,7 диаметра колеса.

Подачу, давление, окружную скорость (частоту вращения) и КПД вентилятора отсчитывают по его аэродинамической характеристике, показывающей функциональную зависимость между этими параметрами. Такая характеристика для вентиляторов Ц4-70 № 12, 12,5, 8 и 16 приведена на рис. 116. По оси абсцисс отложена подача V ($\text{м}^3/\text{ч}$), а по оси ординат — полное давление [Па (мм вод. ст.)]. В поле диаграммы нанесены наклонные прямые КПД вентилятора; средняя линия показывает наибольшую его величину 0,80, а кривые — частоту вращения n (об/мин) и одновременно окружную скорость колеса u (м/с) (шкала — справа), определяемую из соотношения:

$$u = \pi D n / 60 = 0,0524 D n, \text{ или } n = 60 u / 3,14 D = 19,1 u / D. \quad (230)$$

Нижняя часть диаграммы показывает подачу воздуха вентиляторами этого типа, но других размеров, и ею пользуются для подбора вентиляторов. При этом окружную скорость и создаваемые давления принимают постоянными, а частоту вращения колеса обратно пропорциональной его диаметру, т.е. номеру вентилятора. Нетрудно нанести (по квадратичной зависимости) шкалы для других номеров вентиляторов (см. две совмещенные нижние шкалы).

Характеристика вентиляторов Ц4-76 (постотельными лопатками) аналогична приведенной на рис. 116, но с лучшим на 4—5% КПД. Диаграмма дана для плотности стандартного воздуха (при $t=20^\circ\text{C}$, $\varphi=0,5$, $p=101\,325$ Па (760 мм рт. ст.), когда $\rho=1,2$ кг/м³). Если вентилятор должен перемещать более легкий (нагретый) воздух, расчетное давление на диаграмме следует пропорционально увеличить. Например, при $\rho=0,9$ расчетное давление (точнее — разность давлений, создаваемая вентилятором) увеличивается в $1,2/0,9=1,33$ раза. Однако при расчете мощности давление не корректируют по плотности воздуха. Мощность N (кВт) на валу вентилятора

$$N = VH / (1000 \cdot 3600 \eta), \quad (231)$$

[или $VH' / (102 \cdot 3600 \eta)$],

где H или H' — фактическая разность давлений перемещаемого вентилятором воздуха, соответственно, Па или мм вод. ст.; V — часовая его подача, $\text{м}^3/\text{ч}$.

К этой мощности добавляют 3% на трение в подшипниках и 5% на клиноременную передачу. Например, требуется подобрать номер и частоту вращения вентилятора Ц4-70 на подачу воздуха плотностью 0,9 кг/м³, в объеме 50 тыс/(м³·ч) и полном давлении 1050 Па (105 мм вод. ст.). Находим приведенную плотность воздуха $1050 \cdot 1,2 / 0,9 = 1400$ Па (140 мм вод. ст.). На

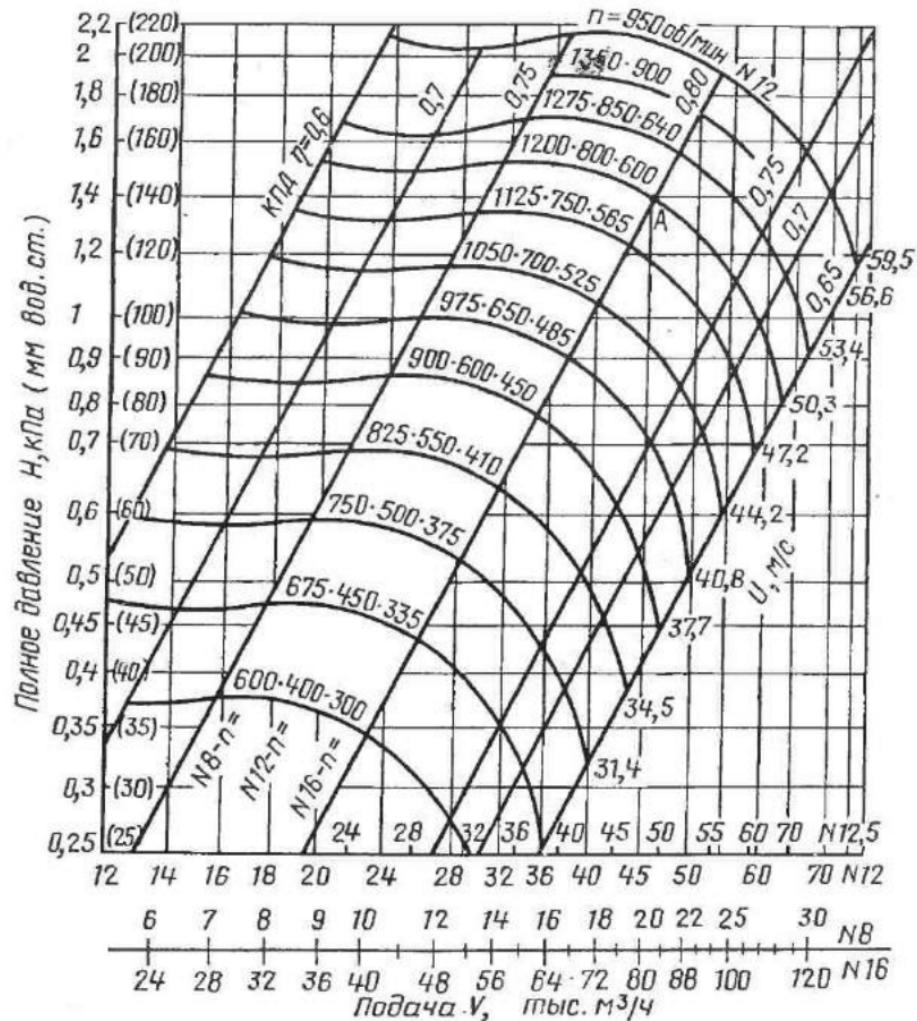


Рис. 116. Аэродинамическая характеристика центробежных вентиляторов Ц4-70

рис. 116 на прямой максимального КПД 0,8 или несколько правее ее (до линии $\eta=0,7$) выявляем для вентилятора № 12,5 точку A с требуемыми параметрами воздуха и частотой вращения вентилятора 800 об/мин.

Существенная особенность центробежных вентиляторов — снижение потребляемой ими мощности с возрастанием сопро-

тивления сети; поэтому при пуске вентилятора желательно полностью или частично перекрывать его воздуховоды, оставляя их прикрытыми до разогрева воздуха в сушильной установке, когда вентилятор будет менее нагружен, а также предварительно подогреть воздух. Колесо вентилятора должно вращаться в направлении разворота спирали кожуха.

Осевые вентиляторы

В лесосушильной технике широко применяют осевые вентиляторы: серии У (универсальный), В (высоконапорный) и ВОК (высоконапорный, осевой, с кручеными лопатками).

Диаметр d втулки вентилятора У-12 (с 12 лопатками) составляет $0,5D$ колеса. Лопатки прямоугольные (по длине и ширине), несимметричные по профилю, с односторонней выпуклостью, объемные (рис. 117, *a*, *b*). Колесо помещается в обечайку с входным коллектором (рис. 117, *в*, *г*). Входной диаметр коллектора $1,2D$, его длина $0,2D$. Вентилятор серии У будет реверсивным, если лопатки через одну закрепить под углом 180° (рис. 117, *е*).

У реверсивного вентилятора подача снижается на 10%, давление на 20%, а максимальный КПД с 0,65 до 0,55. Надлежит создать более эффективный реверсивный вентилятор с кручеными, суживающимися к концам лопатками.

Аэродинамическая характеристика вентиляторов У-12 дана на рис. 117, *ж*, где прямыми наклонными линиями показан номер вентилятора (10; 12; 12,5; 14; 16; 20), а в поле диаграммы — частота вращения при оптимальном угле установки лопаток 22° . Обычно угол установки лопаток этих вентиляторов в сушильных камерах принимают $20\text{--}23^\circ$.

Вентиляторы У модернизированы на тип УК-2М, имеющие крученые лопатки постоянного профиля, КПД до 0,75 [44]. Окружная скорость колеса осевых вентиляторов до 80 м/с.

Для давлений более 1000 Па (100 мм вод. ст.) применяют осевые вентиляторы серии В, характеризующиеся значительным относительным диаметром втулки ($0,6\text{--}0,70$) и 12—16 широкими, суживающимися к концам лопатками (рис. 118). Для повышения КПД и давления за вентилятором (по ходу воздуха) неподвижно устанавливают спрямляющий аппарат с 11 профильными листовыми лопатками (из прямоугольной развертки). Перед вентилятором по диаметру обода втулки устанавливается кок (неподвижный или врачающийся с вентилятором).

Для модернизации промышленных эжекционно-реверсивных камер может быть использован консольно расположенный на валу вентилятор В № 10 с $n=1460$, $N=17$ кВт, с углом установки лопаток $30\text{--}35^\circ$ (их числом 12 и 16); вал показан на рис. 118, *в*. Коренной подшипник ставят на стену в нишу, вблизи внутренней поверхности камеры, отделенной от ниши щит-

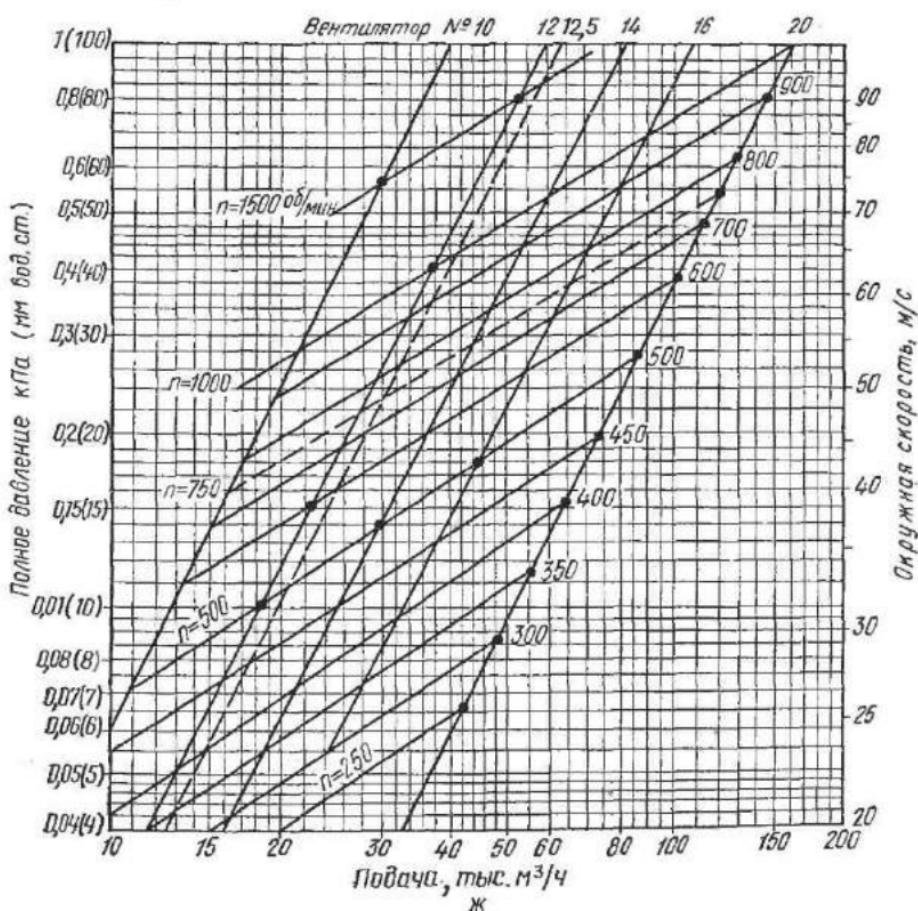
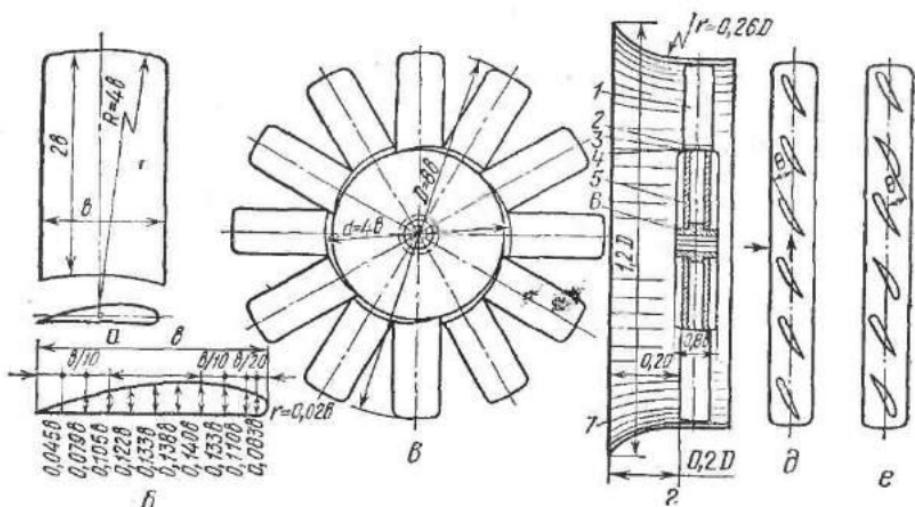


Рис. 117. Осевой вентилятор У-12:

а — лопатка вентилятора; **б** — профиль лопатки; **в** — колесо; **г** — поперечный разрез колеса и коллектора; **д** — развертка посадки лопаток (оптимальный угол $\theta = 22^\circ$); **1** — обшивка лопатки; **2** — днище лопатки; **3** — обод втулки; **4** — шпилька для правильной посадки лопатки; **5** — диск; **6** — ступица; **7** — коллектор; **е** — посадка лопаток реверсивного вентилятора; **ж** — аэродинамическая характеристика вентилятора

ком, а концевой — в коридоре управления; оба подшипника — вне камеры; они монтируются в корпусах «плавающими» на ± 1 мм вдоль оси вала; масса вентилятора до 35 кг.

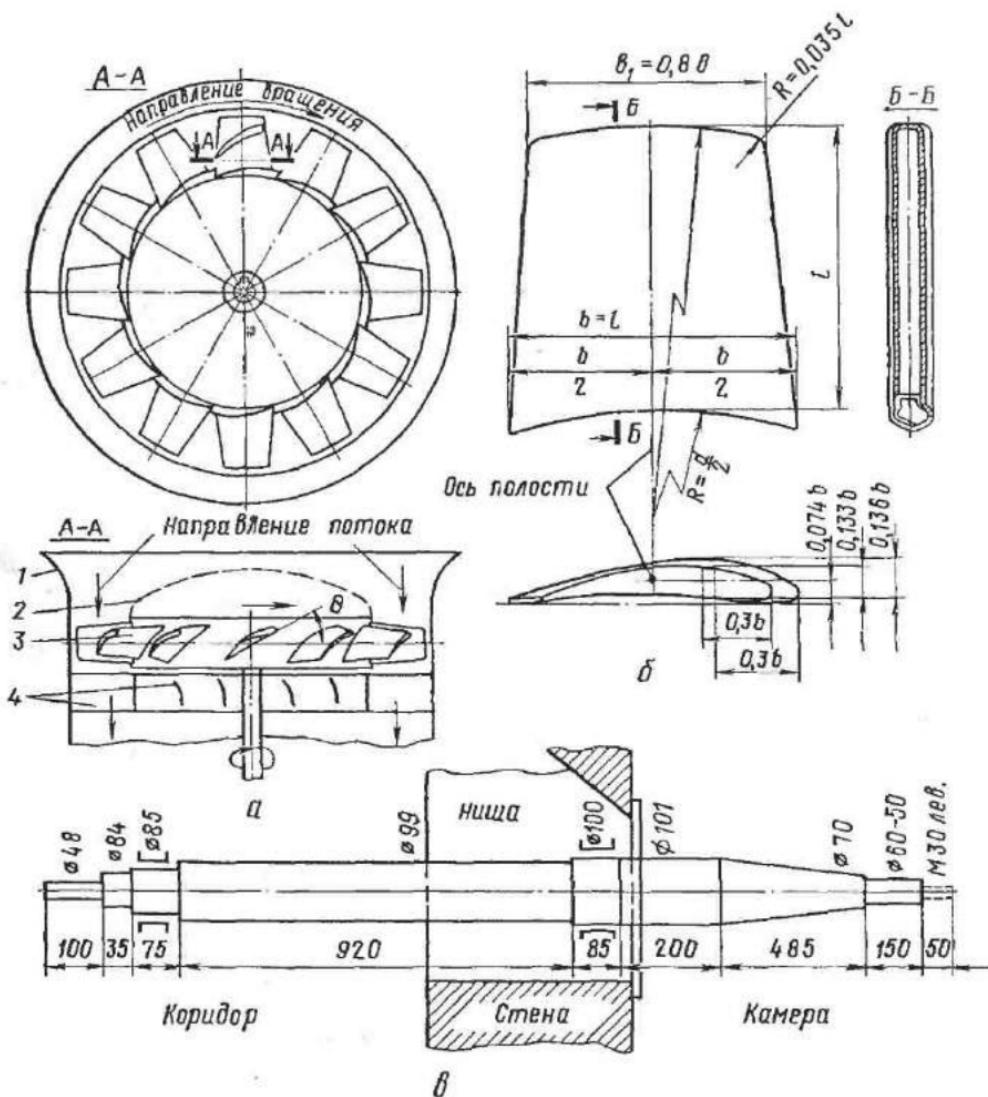


Рис. 118. Вентилятор В с коллектором и несущим валом:

4 — колесо вентилятора с коллектором: 1 — коллектор; 2 — кожух; 3 — колесо вентилятора; 4 — лопатка спрямляющего аппарата; б — лопатка; в — вал вентилятора с консолью 800 мм

Аэродинамическая характеристика вентиляторов В № 8, 9, 10, 11 при $\Theta=20 \dots 40^\circ$ приведена на рис. 119. Вентиляторы У и В изготавливают обычно правого вращения.

Более совершенны литые из легких сплавов (алюминиевых, магниевых) осевые вентиляторы с кручеными лопатками в фор-

ме пропеллера. В угольной промышленности для проветривания шахт широко используют вентиляторы ВОК (К-84) литые и с пустотельными кручеными лопатками. Вентиляторы ВОК-1,0 (диаметром 1000 мм) и ВОК-1,1 можно применять в лесосушильной технике. Их КПД доходит до 0,8. Используют также новые вентиляторы 6—84 и К-Ш. Угол установки крученої ло-

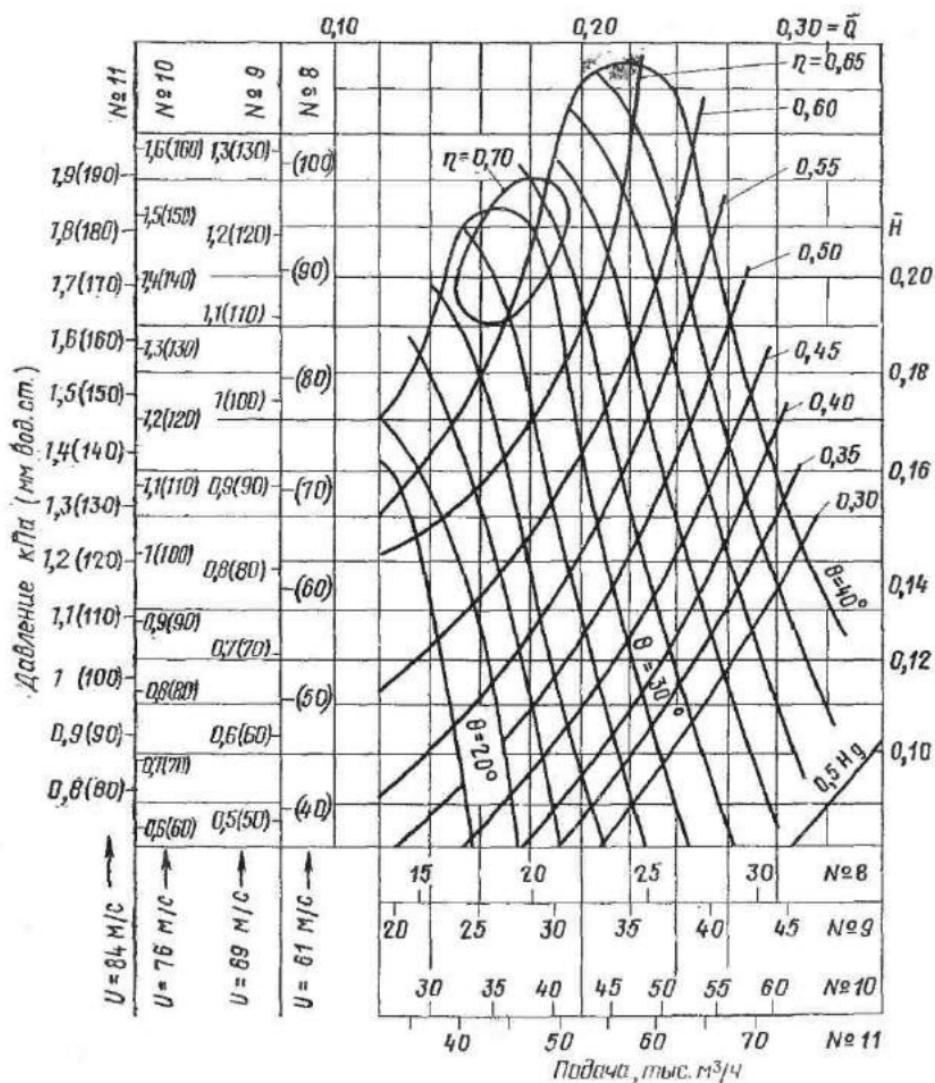


Рис. 119. Аэродинамическая характеристика вентилятора В при 1460 об/мин

патки измеряется на средине ее длины (оптимально 30—35°).

В сушильных туннелях используют легкие вентиляторы с тонкими листовыми, но также кручеными лопатками. Такие вентиляторы диаметром 1250 мм с 960 об/мин установлены в сушильном туннеле «Валмет» (рис. 104, а), $V=18 \text{ м}^3/\text{с}$.

Вентиляторы должны вращаться в правильном направлении так, чтобы на воздух набегала тупая кромка и одновременно плоская (у вентилятора У) или вогнутая (у вентиляторов В и ВОК) сторона лопатки. Внутри вентиляторов часто налипает много пыли, гнутся лопатки или появляются большие зазоры (более 1,5% от длины лопатки) между колесом и обечайкой. Это недопустимо. Для смазывания подшипников вентиляторов, работающих при температуре выше 100° С применяют натриевые консистентные смазки УТ, УТс, УТВ-1-13 и УТВ-2-13 с температурой каплепадения около 130° С, а при температурах до 80° С — кальциевые смазки (солидолы) и др.

ГЛАВА 10. ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ в ЛЕСОСУШИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

62. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Процесс сушки древесины многообразен по физическому содержанию. Для выявления параметров и управления этим процессом необходимо пользоваться многими контрольно-измерительными и регулирующими приборами. Далее рассмотрены основные приборы для измерения температуры, психрометрической разности, скорости и давления воздуха, влажности древесины, а также методы автоматизации сушильного процесса.

Процесс сушки материала обусловлен главным образом тепловыми явлениями. Для их оценки необходимо замерять степень нагрева наблюдаемого газообразного, жидкого и твердого вещества, т. е. определять его температуру. В этих целях в лесосушильной технике используют стеклянные ртутные и манометрические термометры, термометры сопротивления, термоэлектрические термометры, а также оптические пирометры.

Технические ртутные термометры (ГОСТ 2823—73) наиболее пригодны прямые, со шкалой из молочного стекла от 0 до 100° С или от 0 до 150° С. Допускаемая их погрешность $\pm 1^{\circ}$ С. Длина верхней части 240 мм, нижней части — переменная: $l=60; 100; 160$ мм и т. д.; диаметры их соответственно равны 20 и 8 мм (рис. 120, а). Не рекомендуется приобретать угловые термометры, они чрезвычайно хрупки и ненадежны в производственных условиях (смена марли, необходимость периодической проверки и т. д.). Для лучшей сохранности их помещают в защитную металлическую оправу.

Во избежание порчи ртутных термометров нельзя резко подогревать их, а также нагревать выше температуры, обозначенной на шкале. Не рекомендуется применять термометры с пробкой, залитой гипсом, пропускающим влагу, которая портит шкалу; более надежны в работе приборы с герметически закрытой стеклянной оболочкой.

Контактные термометры по форме аналогичны измерительным ртутным (рис. 120, б). В их капилляр впаивают два металлических контакта, идущих от реле, включенного в цепь электрического нагревателя. Максимально допускаемый ток через столбик ртути 1; 0,5 и 0,15 А при напряжениях соответственно 6; 12 и 24 В. Назначение контактного термометра — автоматически отключать с помощью реле электрический на-

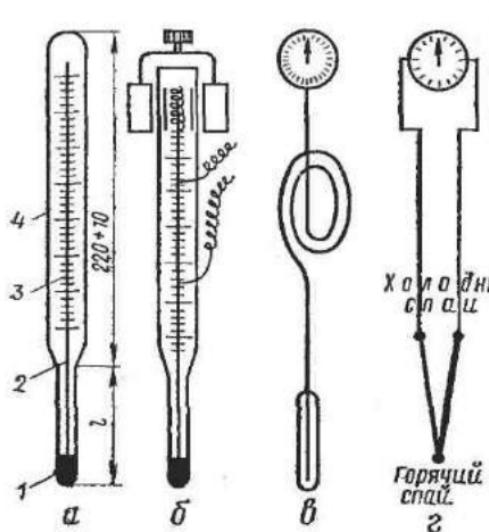
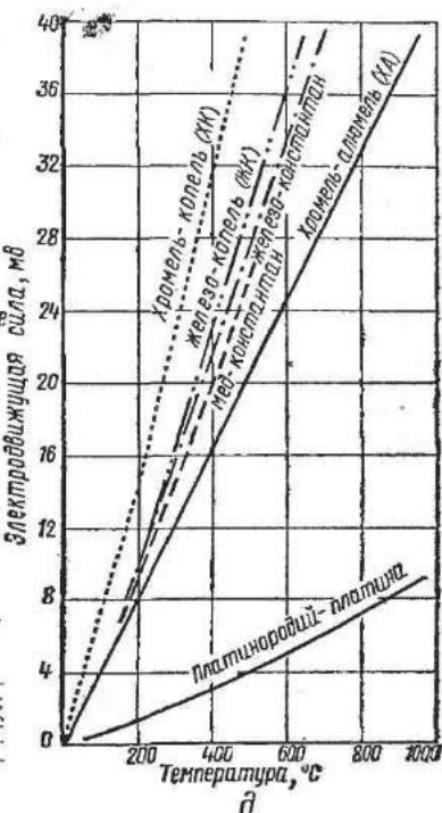


Рис. 120. Приборы для измерения температуры:

а — технический термометр: 1 — баллон ртутного термометра; 2 — капилляр; 3 — шкала;
б — контактный термометр с магнитной головкой; **в** — манометрический термометр; **г** — термопара; **д** — график характеристик термопар



греватель при достижении заданной температуры в зоне контактного термометра. Вращающейся магнитной головкой, надетой на прибор, один из контактов может перемещаться в капилляре, настраивая прибор на требуемую температуру.

Манометрический термометр представляет собой металлический баллон, соединенный с длинным металлическим капилляром и полой пружиной на конце, заполненный жидкостью или газом. Деформация пружины (при нагревании или охлаждении баллона) фиксируется стрелкой или пером. Могут быть использованы приборы ТГ с пределами шкалы 0—110° С, приборы дистанционного действия (рис. 120, в). Последние малонадежны — в условиях влажной, агрессивной среды сушильных камер капилляры быстро портятся.

Термометр сопротивления — удобный прибор для дистанционного определения температуры среды. Принцип его действия основан на возрастании сопротивления проводника при нагревании. Чувствительным элементом служит длинная тонкая питающаяся током изолированная проволока, чаще медная, намотанная на цилиндрический стержень, подключенная посредством присоединительных проводов к одному из плеч мостовой схемы вторичного прибора — логометра или автоматического уравновешенного моста. Термометр сопротивления нуждается в тщательном расчете сопротивлений присоединительных проводов и подгонке сопротивлений всей системы при монтаже прибора.

Термоэлектрические термометры (термопары) действуют по принципу возникновения электрического тока в цепи, состоящей из двух разнородных проводов, если один из них спаен подогреть. Для измерения электродвижущей силы, почти пропорциональной разности температур обоих спаев, в цепь включают милливольтметр или иной прибор (рис. 120, г). Для точных измерений холодные спаи помещают в среду тающего льда (0°C). В производственных условиях учитывают одинаковую температуру клемм у концов обоих проводов. При равенстве температур спая и других концов проводов показание прибора должно быть нулевым.

Термопары, предназначенные для измерения высоких температур, например в топке, снабжают защитным металлическим или керамическим чехлом. Чтобы термопара не изгибалась в нагретом состоянии, рекомендуется устанавливать ее в задней части топки или в борове вертикально.

Для измерения температуры в топках (до 1000°C) наиболее применимы термопары из термоэлектродов хромель-алюмель, а в лабораторной практике (до 400°C) — медь-константан; их термо-ЭДС при нагревании от 0 до 100°C соответственно 4,1 и 4,25 мВ. Зависимость ЭДС от температуры дана на диаграмме рис. 120, д.

Оптический пирометр позволяет определить на расстоянии 0,5—5 м температуру пламени или поверхности раскаленных твердых тел. В его основу положено сравнение яркости излучения исследуемого тела с излучением нити лампочки накаливания, находящейся внутри прибора и питаемой током. Накал нити, регулируемый реостатом, изменяется до тех пор, пока она не сольется с фоном исследуемого тела, наблюдаемого через прибор вместе с нитью. По силе тока, проходящего в этих условиях через нить, отсчетом на шкале прибора устанавливают температуру исследуемого тела. Существует несколько конструкций этих приборов.

Ошибки при измерении температуры среды могут быть вследствие неточности показаний самого прибора или отсчета или из-за неправильной его установки. Так, размещение прибора вблизи дверей сушильных камер, или у стены, или на

местном потоке охлажденного воздуха приведет к заниженным отсчетам температуры. Наоборот, расположение прибора в местном более нагретом потоке воздуха или рядом с калорифером, паропроводами, и т. д., испускающими невидимые тепловые лучи, способствуют его дополнительному нагреванию. Нельзя, например, измерить ртутным техническим термометром распределение температур по толщине листа фанеры или тонкой доски вследствие несоответствия датчика прибора измеряемому объекту.

В ряде случаев теплота отводится по корпусу самого прибора. Поэтому при установке в трубе чувствительная часть термометра должна быть направлена навстречу измеряемому потоку. При измерении температуры доски термометр следует заделать через ее кромку на значительную глубину, параллельно пласти. В случае выявления температуры поверхности термопара (плоская) должна прилегать к измеряемой поверхности частью длины провода, равной не менее 20 ее диаметров, и т. д.

63. ИЗМЕРЕНИЕ ПСИХРОМЕТРИЧЕСКОЙ РАЗНОСТИ ВОЗДУХА

Основной прибор для измерения температуры и психрометрической разности воздуха — психрометр. Для более точных замеров этих параметров воздуха в метеорологии и вентиляционной технике применяют аспирационный психрометр, особенностью которого является просасывание воздуха вокруг термометра маленьким вентилятором, монтируемым в корпусе прибора.

На рис. 121, а показан переносный психрометр со стаканчиком для воды, а на рис. 121, б, в, г — переносные психрометры с большими запасами воды в баллонах 3. Последние три прибора применяют только при температуре ниже 100° С (вода будет выдавлена из баллона паром в нем).

Особенность стационарного потолочного психрометра (рис. 121, е) в том, что вода из баллона в стаканчик подается, когда при понижении уровня воды в стаканчике 7 откроется нижний конец трубки и в баллон пройдет пузырек воздуха. Поэтому соединительная резиновая трубка, как и латунная трубка 6, должна быть диаметром не менее 8 мм и не иметь перегибов.

Настенный психрометр (рис. 121, д) широко применяют в промышленности. Ограждающим коробом шкалы термометров изолированы от воздуха камеры и при открывании дверки удобны для отсчета.

Так как точность показаний стандартных технических термометров $\pm 1^{\circ}\text{C}$, величину психрометрической разности отсчитывают с отклонением 2°C от истинной ее величины. Это, особенно в начале процесса сушки толстого материала, может привести к образованию в нем трещин или задержать его просыхание. Поэтому оба термометра в каждом психрометре должны

быть парными в рабочем диапазоне шкалы и подобраны путем одновременной сверки и выбора парных из партии имеющихся термометров. Термометры со временем «стареют», поэтому при высушивании пиломатериалов, склонных к растрескиванию, ежеквартально сверяют парность показаний обоих технических термометров психрометра. Для этого временно снимают марлю, вытирают мокрый термометр и оставляют на

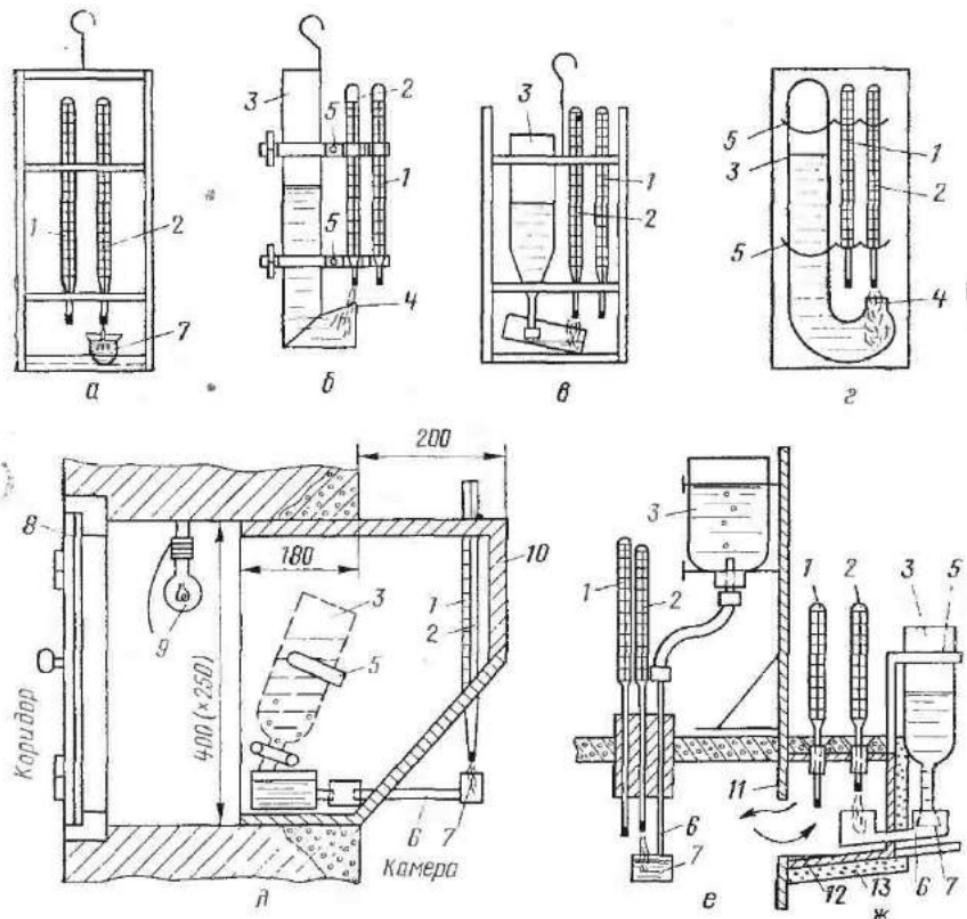


Рис. 121. Психрометры:

а — переносный со стаканчиком; *б, в, г* — переносные с баллонами воды; *д* — настенный стационарный; *е* — потолочный стационарный; *ж* — сбоку на вентиляторе; *1* — термометр; *2* — мокрый термометр; *3* — баллон; *4* — отверстие диаметром 7—8 мм в баллоне; *5* — хомутники; *6* — трубка латунная; *7* — стаканчик; *8* — дверка; *9* — лампочка; *10* — короб; *11* — стена вентилятора; *12* — коробка к вентилятору; *13* — теплоизоляция

1—2 ч оба термометра в постоянных температурных условиях, наблюдая за их показаниями. Отсчет по вертикальной шкале ошибочен, если смотреть на шкалу сверху или снизу. Направление взгляда во всех случаях должно быть перпендикулярным шкале в точке отсчета.