

И. В. Кречетов
профессор доктор технических наук

СУШКА ДРЕВЕСИНЫ

Издание третье, переработанное

МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ЛЕСНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ»
1980

Рецензент канд. техн. наук Бывших М. Д. (Воронежский лесотехнический институт).

Кречетов И. В. Сушка древесины.— 3-е изд. перераб.— М.: Лесн. пром-сть, 1980.— 432 с.

Рассмотрены теория, технология, техника и организация сушки древесины. Описаны свойства и применение в сушильной технике водяного пара, воздуха и продуктов сгорания как сушильных агентов. Приведены сведения об эксплуатации лесосушильных установок, экономичности сушки, совершенствовании техники и технологии, улучшении качества сушки. 2-е издание вышло в 1972 г.

Для инженерно-технических работников лесной и деревообрабатывающей промышленности. Может быть полезна студентам лесотехнических вузов. Табл. 31, ил. 161, библиогр.— 68 назв.

Иван Васильевич Кречетов

СУШКА ДРЕВЕСИНЫ

Издание третье, переработанное

Редактор издательства В. В. Круглова
Художественный редактор В. Н. Тикунов
Технический редактор В. М. Волкова
Переплет художника С. В. Аладьева
Корректор Е. Е. Ярина

ИБ № 437

Сдано в набор 23.07.79. Подписано в печать 24.01.80. Т-02633. Формат 60×90/16. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 27+вкл. 0,5. Уч.-изд. л. 29,88+вкл. 0,52. Тираж 7000 экз. Заказ 3037. Цена 1 р. 90 к.

Издательство «Лесная промышленность», 101000, Москва, ул. Кирова, 40а

Типография им. Анохина
Управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Совета Министров Карельской АССР
Петрозаводск, ул. «Правды», 4.

К 31503—014
037(01)—80 74—80 3002000000

ПРЕДИСЛОВИЕ

Со времени выхода в свет второго издания книги (1972 г.) произошли значительные изменения в теории и технологии сушки различных древесных материалов. В соответствии с решениями партии и правительства возникли новые, более сложные требования дальнейшего совершенствования и развития техники и производства. Одно из них — более эффективное использование древесины. Этому требованию отвечает снижение удельного ее расхода, а также повышение качества продукции с значительным удлинением сроков службы изготовленных изделий.

Ключевой технологический процесс, коренным образом повышающий качество древесины как материала, — ее обезвоживание, осуществляемое методом сушки по возможности точно до требуемой конечной влажности. В результате правильного проведения этого процесса из биологически нестойкого, технологически нестабильного и не поддающегося отделке сырья древесина превращается в ценный строительный, конструкционный, поделочный и декоративный материал с рядом исключительных положительных свойств.

Экономное использование древесины предопределяется также правильностью и эффективностью проведения самого процесса сушки; при неточном его осуществлении образуются крупные отходы из-за возникновения покоробленности, различных форм искривления пиломатериалов и их растрескивания во время сушки, а также при механической обработке и в последующем — готовых деталей и изделий.

Специфика сушки древесины обуславливается сложностью ее проведения из-за разнообразия физико-механических свойств различных пород, анизотропии строения древесины в трех основных направлениях, большого различия в размерах древесных сортиментов, неодинаковых качественных требований к сушильному процессу, сложности физических явлений, возникающих при сушке, большой длительности сушки пиломатериалов, а также многообразия областей и условий ее использования. Все это затрудняет установление аналогий и обобщений в технологии и технике сушки и нахождение типовых решений.

В настоящем издании книги содержится ряд сведений из новейшей научной и технической литературы, а также из практики о повышении уровня и развитии рассматриваемой области производства. Включены новые рекомендации автора по совершенствованию сушильного процесса и техники сушки древесины, улучшению методов контроля сушильного производства, упрощению специальных расчетов, нормализации проектных разработок и т. д.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Сущность, цель и значение сушки древесины	4
1. Роль влаги в древесине	4
2. Сущность процесса сушки	5
3. Физические методы удаления влаги из древесины	6
4. Значимость сушки	8
5. Промышленное применение различных способов сушки	12
6. Экономика массовой сушки пиломатериалов	14
Глава 2. Свойства водяного пара и воздуха как сушильных агентов (термодинамика сушки)	16
7. Физические свойства водяного пара (применительно к сушке древесины)	16
8. Тепловые свойства водяного пара как сушильного агента	20
9. Состояние и параметры воздуха как сушильного агента	23
10. <i>Id</i> -диаграмма воздуха	31
11. Нанесение на <i>Id</i> -диаграмму элементарных процессов	39
12. Нанесение на <i>Id</i> -диаграмму циклических процессов сушки	45
Глава 3. Свойства и применение продуктов сгорания как сушильного агента	54
13. Особенности продуктов сгорания как сушильного агента	54
14. Характеристика продуктов сгорания древесного топлива	57
15. Построение <i>Ida</i> -диаграммы для продуктов сгорания древесного топлива	64
16. Нанесение тепловых процессов на <i>Ida</i> -диаграмму	67
17. Расчетные параметры продуктов сгорания и их измерение	74
18. Сушильный агент из продуктов сгорания древесины	78
19. Продукты сгорания других видов топлива	78
Глава 4. Свойства древесины как объекта сушки	81
20. Строение ствола дерева	81
21. Гигроскопические свойства и равновесная влажность древесины (статика сушки)	83
22. Количественное значение влажности древесины	94
23. Уруго-вязкие свойства древесины, проявляющиеся при сушке	96
24. Закономерности усушки и усадки древесины	101
25. Деформация пиломатериалов при сушке	106
26. Методы снижения деформаций пиломатериалов	111
27. Влияние влажности и нагрева на физико-механические свойства древесины	115
Глава 5. Физические явления при сушке древесины	125
28. Характер физических явлений процесса сушки	125
29. Закономерности нагревания и охлаждения древесины	126
30. Испарение воды со свободной поверхности	138
31. Испарение влаги с поверхности гигроскопического материала	139
32. Движение влаги в древесине (динамика сушки)	141
33. Протекание процесса сушки во времени (кинетика сушки)	150

34. Внутренние деформации, возникающие в пиломатериалах в поперечном направлении при сушке	156
Глава 6. Процессы и режимы конвективной сушки древесины	165
35. Кинетические закономерности конвективных процессов сушки	165
36. Понятие о режимах сушки пиломатериалов	167
37. Режимы камерной сушки пиломатериалов	171
38. Режимы сушки пиломатериалов в противоточных туннелях	174
39. Усовершенствование процессов сушки пиломатериалов	176
40. О развитии в высушиваемом материале трещин и раковин	186
41. Влаготеплообработка высушенных пиломатериалов	189
Глава 7. Аэродинамика в сушильной технике	192
42. Содержание и значение аэродинамики в лесосушильной технике	192
43. Общие сведения об аэродинамике применительно к сушке древесины	193
44. Естественное движение воздуха при сушке пиломатериалов	200
45. Побудительное движение воздуха по материалу	204
46. Применение эжекционного побуждения циркуляции воздуха	207
47. Влияние циркуляции воздуха в камерном процессе на равномерность просыхания материала	211
48. Взаимозависимость параметров — воздуха и влажного материала в туннельном процессе сушки	214
Глава 8. Типы и конструкции лесосушильных установок	220
49. Предъявляемые требования, принципы действия и классификация	220
50. Типоразмеры штабелей пиломатериалов	223
51. Лесосушильные камеры с естественной циркуляцией воздуха (малой мощности)	225
52. Лесосушильные камеры с паровым обогревом	229
53. Лесосушильные камеры с другими методами обогрева	238
54. Лесосушильные туннели	243
55. Оборудование для кондиционирования высушенных пиломатериалов	254
56. Строительные элементы лесосушильных установок	256
Глава 9. Сушильное оборудование	259
57. Топки и огневые калориферы	259
58. Паровые калориферы	265
59. Конденсатоотводчики	270
60. Электрокалориферы	275
61. Вентиляторы	277
Глава 10. Приборы и измерения в лесосушильной технике	286
62. Измерение температуры	286
63. Измерение психрометрической разности воздуха	289
64. Измерение давления и скорости воздуха	292
65. Измерение влажности древесины	295
66. Автоматизация регулирования сушки пиломатериалов	296
67. Рекомендуемые методы регулирования сушильных туннелей и камер	301
Глава 11. Укладка пиломатериалов и эксплуатация лесосушильных установок	304
68. Укладка пиломатериалов для сушки	304
69. Погрузочные и транспортные средства	309
70. Подготовка оборудования и материала к сушке	317
71. Нагревание материала перед сушкой	320
72. Проведение процесса сушки	322
73. Особенности эксплуатации газовых сушильных установок	328
74. Конечная влажность материала и окончание процесса сушки	329
75. Дефекты сушки пиломатериалов и их предупреждение	333

Глава 12. Качество сушки и производительность	335
76. Нормализация качества сушки пиломатериалов	335
77. Условный материал	339
78. Продолжительность сушки пиломатериалов	340
79. Определение продолжительности сушки по сумме коэффициентов	344
80. Расчет годовой производительности лесосушильных установок	347
81. Учет производительности в условном материале	349
Глава 13. Атмосферная сушка пиломатериалов	354
82. Параметры процесса и особенности атмосферной сушки	354
83. Планировка склада, климатические зоны и микроклимат	357
84. Конструкции штабелей и способы укладки пиломатериалов хвойных пород	362
85. Особенности атмосферной сушки пиломатериалов твердолиственных пород	366
86. Продолжительность атмосферной сушки пиломатериалов и способы ее интенсификации	367
87. Антисептирование пиломатериалов и санитарное содержание склада	373
Глава 14. Особые виды сушки древесины	375
88. Сушка измельченной древесины в производстве древесностружечных плит	375
89. Расход тепла на сушку измельченной древесины	381
90. Автоматизация сушки измельченной древесины	384
91. Применение токов высокой частоты для сушки древесины	385
Глава 15. Экономика сушки древесины	386
92. Удельный расход пара, топлива и энергии на сушку пиломатериалов	386
93. Техничко-экономические показатели лесосушильных установок	389
94. Рекомендации по совершенствованию существующей лесосушильной техники	391
Глава 16. Проектирование лесосушильных установок	393
95. Требования к проектированию лесосушильных установок	393
96. Выбор способа сушки древесины (в досках или заготовках)	398
97. Выбор сушильных туннелей или камер, их количество и планировка	399
98. Тепловой расчет паровых сушильных камер	401
99. Аэродинамический расчет сушильных камер	407
100. Последовательность и содержание расчетов сушильной камеры	412
101. Особенности расчетов сушильных установок	412
102. Технические и конструктивные решения сушильных установок	416
Список литературы	427

ГЛАВА I. СУЩНОСТЬ, ЦЕЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

I. РОЛЬ ВЛАГИ В ДРЕВЕСИНЕ

В растущем дереве содержится значительное количество влаги. Она необходима для поддержания жизнедеятельности клеток дерева. В природных условиях жизни леса влага играет положительную роль также в каждом отмершем дереве. Она способствует развитию в древесине микроорганизмов, следовательно своевременному биологическому ее разрушению и удобрению таким образом почвы.

При использовании срубленной и обработанной древесины возникает необходимость в предотвращении биологического разрушения древесины, придании ей стойкости против гниения. Наиболее просто это достигается удалением из древесины почти всей влаги. Таким способом из нестойкого сырья биологического происхождения древесина превращается в очень ценный материал, сохраняющийся длительное время.

Влагу (в избыточном количестве) часто используют для предохранения древесины от гниения. Из практики известно, что подводная часть свай, затопленные бревна и т. п. сохраняются длительное время — десятки и сотни лет. Способ затопления древесного сырья для его сезонного хранения широко используют в фанерном производстве, а искусственное дождевание штабелей бревен — в лесопильном. При этом из древесины влагой вытесняется воздух (в том числе кислород), необходимый для жизнедеятельности дереворазрушающих грибов.

Особенно быстро (за 1—2 мес) в летнее время портится срубленная, но не разделанная и, следовательно, не просушенная в короткий срок, древесина бука, березы и осины; гниют и сырые доски, уложенные в плотную стопу. Необходимо поэтому бревна этих древесных пород, а также клена, ясеня, ольхи, липы и др. срочно распиливать и затем доски немедленно сушить с максимально допустимой интенсивностью.

Основные факторы гниения древесины — умеренная температура (5—40° С), кислород воздуха и значительная (но не близкая к максимальной) ее влажность. Для сохранения древесины желательно, чтобы в результате обезвоживания в ней осталось менее пятой части влаги по отношению к массе самой древесины, а в случае хранения методом доувлажнения масса

влаги должна быть больше массы самой древесины. Отношение массы влаги к массе самой древесины называют ее *влажностью*; в отмеченных примерах влажность древесины составляет 0,2 (т.е. 20%) и более 1 (т.е. более 100%).

Если древесина будет находиться в условиях эксплуатации на открытом воздухе, ввиду неизбежности повторного увлажнения атмосферными осадками предварительная сушка для предохранения древесины от гниения бесполезна. Поэтому шпалы, столбы различного назначения, элементы мостов и т.п. консервируют, пропитывая их токсичными для грибов химикатами (каменноугольным пропиточным маслом, хлористым цинком, сланцевым маслом и др.). Срок службы консервированной древесины удлиняется в несколько раз.

Следует иметь в виду, что для эффективной пропитки древесины современными методами ее подсушивают (только при диффузионном методе лучше пропитывается сырая древесина).

2. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

Наиболее экономичный и распространенный метод обезвоживания древесины — это ее сушка, осуществляемая за счет подвода к влажному материалу тепла нагретым воздухом (или

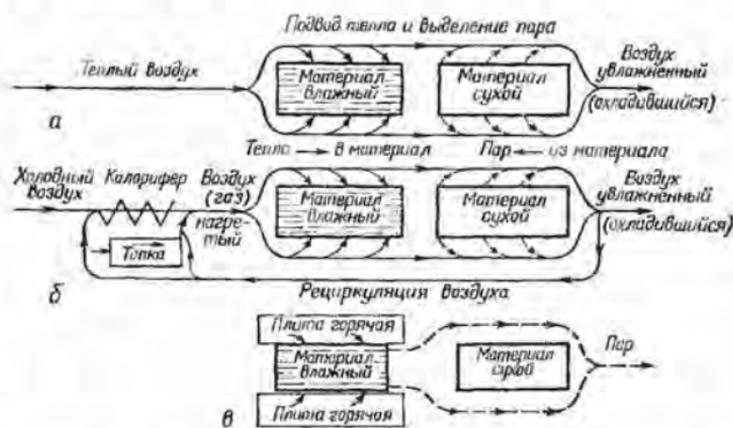


Рис. 1. Принципиальная схема подвода тепла к высушиваемому материалу: а — конвективно — с теплым воздухом (при атмосферной сушке); б — конвективно — с нагретым воздухом или продуктами сгорания (в сушильных установках); в — кондуктивно — горячими плитами, с выпариванием влаги (штриховкой показана влага в материале)

продуктами сгорания) и уноса испарившейся влаги этим же, но частично увлажнившимся и охладившимся воздухом. Для превращения воды в парообразное состояние требуется затратить около 2600 кДж тепла.

Процесс испарения влаги воздухом может происходить без искусственного его подогрева, что характерно для атмосферной сушки (рис. 1, а), когда используется теплота относительно

нагретого солнцем наружного воздуха. С помощью подвода к материалу теплоты (продуктов сгорания, воздуха от калориферов, или электронагревом), получаемой в результате сжигания топлива, применения электроэнергии от тепловых или гидравлических станций и т. п., осуществляют комбинированную сушку.

Так как объем выделяющегося из материала пара при обычной температуре сушки (50—100°С) примерно в 1,2—1,7 тыс. раз больше объема испарившейся воды, пар устремляется из нагретой древесины в окружающий воздух и отводится им. Следовательно, для сушки необходимо с воздухом подводить тепло и уносить парообразную влагу, т. е. осуществлять циркуляцию воздуха по материалу.

Основной вид продукции лесопильных заводов, подвергаемой сушке, — пиломатериалы. Продолжительность процесса их высушивания в специальных камерах весьма значительна — 1—30 сут, в зависимости от толщины и породы пиломатериалов. Такой длительный процесс трудно конвейеризировать. Поэтому пиломатериалы укладывают горизонтальными рядами на прокладках в транспортируемый штабель больших размеров (масса 10—20 т). Через такой штабель по зазорам вдоль прокладок продувают нагретый воздух, уносящий из древесины влагу. Так как при обдувании сухим воздухом пиломатериалы растрескиваются, процесс сушки проводят во влажной среде. В этих целях используется влага, испарившаяся из древесины: вышедший из штабеля увлажненный воздух повторно подогревают в калориферах (или добавляют горячие продукты сгорания) и вторично направляют в тот же штабель материала, т. е. применяют метод рециркуляции воздуха. Во всех современных сушильных установках для пиломатериалов используется принцип рециркуляционного конвективного подвода тепла к материалу (см. рис. 1, б).

На рис. 1, в схематически изображена передача к материалу тепла горячими металлическими поверхностями, контактирующими с материалом — кондуктивный подвод тепла. В этом случае отпадает потребность в воздухе как сушильном агенте. Возможен подвод тепла к материалу лучеиспусканием (от ламп или горелок), а также диатермический нагрев — электрическим током или токами высокой частоты.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

Количество влаги, содержащейся в свежесрубленной или сплавной древесине, уменьшается из-за стекания ее в жидком состоянии (механического обезвоживания) или превращения жидкости в пар, т. е. изменения ее агрегатного состояния. Наиболее заманчиво удаление влаги из древесины именно в жидком состоянии, без затраты тепла на ее парообразование.

Замечено, что в очень сырых лесоматериалах некоторых древесных пород (бук, сосна) при вертикальном положении в летнее время часть влаги внутри древесины перетекает вниз и даже вытекает наружу. При нагревании древесины этот эффект возрастает.

Исследованиями установлено, что при пропарке буковых пиломатериалов в среде насыщенного пара с температурой около 100°C значительная часть влаги удаляется из древесины в жидкой фазе при горизонтальном положении досок или заготовок, т. е. при поперечном токе влаги. Влажность их при температуре около 100°C , атмосферном давлении и продолжительности пропарки не менее 10 ч понижается от начальной 70—80% до 40%, а у более сухой одновременно пропариваемой буковой древесины повышается почти до этого значения.

В жидком состоянии влага вытекает также из торцов сжигаемых сырых дров. Если вместе с жидкостью выходит пар, наблюдается характерное шипение с образованием пузырьков на менее нагретых торцах дров. Продвижение влаги совпадает при этом с направлением теплового потока в древесине; влага перемещается от большей температуры к меньшей.

Влага может мигрировать в древесине и вытекать из нее в виде жидкости под воздействием постоянного электрического тока. Продвижение ее происходит от положительного электрода к отрицательному. Это явление называется *электроосмосом*. Влага передвигается также при воздействии на древесину магнитного и электромагнитного полей, с проявлением магнитной диффузии и электродиффузии [2].

Механическое обезвоживание в пресс-фильтрах, шнеках и центрифугах широко применяют в различных отраслях промышленности для снижения влажности, например, химикатов, торфа, текстиля и др. Таким образом можно обезвоживать древесную кору, стружку, опилки, а также короткие образцы древесины рассеянососудистых пород. Исследовано частичное обезвоживание центробежным методом сырых бревен для повышения их плавучести [3]. Такой метод может предшествовать процессу камерной сушки пиломатериалов. Частично выдавливается и вытекает влага из фанерного шпона во время его лущения.

В указанных условиях обезвоживания (под действием силы тяжести, механических сил и электромагнитного воздействия) влага перемещается в древесине и вытекает из нее, если древесина очень влажная. Метод механического отсоса влаги из торца бревна неэффективен даже в сочетании с наддувом нагретого воздуха в другой торец этого бревна. Неэффективен и метод вакуумирования влажной древесины.

Здесь и далее имеется в виду, что процесс сушки древесины протекает при *атмосферном давлении*. Сушка древесины в вакууме или при избыточном давлении не получила промышлен-

ного применения (главным образом из-за трудностей, связанных с герметизацией и усложнением установок).

Если парообразование во влажном материале происходит при температуре влаги равной или выше 100°C , процесс сушки называется *выпариванием*. Если парообразование происходит при температуре влаги ниже 100°C , процесс называется *испарением*. Так как при температуре ниже 100°C давление пара ниже 0,1 МПа (1 бар), в атмосферных условиях пар интенсивно может отводиться от материала лишь вместе с воздухом. Выпаривание из полусухого материала (когда влага находится в гигроскопическом состоянии) происходит при температуре влаги и материала выше 100°C .

В зимнее время древесина частично подсыхает на открытом воздухе (метод *сублимации*), когда влага переходит из твердого непосредственно в парообразное состояние.

Таким образом, под термином *обезвоживание* подразумевают удаление из материала влаги в любой ее форме и любыми возможными способами, в том числе и механическим воздействием. На рис. 2 приведена структурная схема возможных способов и процессов обезвоживания древесины. Жирными линиями с заштрихованными прямоугольниками указаны процессы, имеющие наибольшее промышленное значение. Они характеризуются превращением жидкой влаги материалов в пар. Тепло подводится к поверхности материала конвективно от газообразной среды.

4. ЗНАЧИМОСТЬ СУШКИ

Древесина, используемая в виде досок и заготовок в строительстве, машиностроении, деревообрабатывающем, мебельном и других производствах, только после надлежащей просушки приобретает биологическую стойкость против гниения, способность сохранять форму и размеры деталей в изделиях, максимальную механическую прочность при наименьшей плотности, хорошо обрабатывается, имеет минимальную теплопроводность, электропроводность и др.

Механическая прочность древесины резко возрастает по мере уменьшения количества влаги в диапазоне ниже 30%, причем возрастает непрерывно до удаления всей влаги; одновременно древесина становится легче. В ряде случаев (например, при доставке бревен сплавом) масса очень влажной древесины в результате сушки уменьшается вдвое. По мере просыхания древесины до сравнительно низкой влажности улучшаются ее технологические свойства — чистота распиловки, строгания, шлифования, прочность склеивания, качество отделки и др. Одновременно повышается ее теплота сгорания, что существенно при использовании древесных отходов в качестве топлива. Пропитка антисептиками в условиях заводского



Рис. 2. Структурная схема различных методов и процессов обезвоживания древесины

консервирования в пропиточных цилиндрах лучше протекает после предварительной подсушки подлежащей пропитке древесины примерно влажности до 20—25%.

В зависимости от условий использования древесины цель сушки и требования к отдельным свойствам высушиваемой древесины различны: при массовой сушке пиломатериалов на лесопильных заводах это предотвращение последующего биологического разрушения древесины и уменьшение транспортных нагрузок при доставке потребителю; для строительства и деревообработки, кроме того, предотвращение последующей деформации и преждевременного износа различных устройств и изделий из нее, а также улучшение ее физико-механических свойств; в мебельном производстве, кроме указанного, придание ряда положительных технологических свойств; в специальных производствах (фанерном, спичечном, древесных плит) — придание материалу дополнительных свойств в соответствии с требованиями технологических процессов этих производств; в музыкальной промышленности, кроме всего перечисленного, достижение быстрого «старения» (стабилизации) древесины.

Во всех случаях цель сушки — превращение древесины из природного сырья в промышленный материал с коренным улучшением при этом ее биологических, физико-технических, технологических и потребительских свойств. В результате сушки должен получаться облагороженный материал, более качественный и ценный, отвечающий многообразным высоким требованиям, предъявляемым к нему в различных производственных и бытовых условиях.

Хозяйственное значение сушки древесины велико. Сушку древесины на предприятиях обычно проводят до заданной величины ее влажности в специальных сушильных установках. Существенный недостаток непросушенной или недосушенной древесины — ее последующая дополнительная усадка в перпендикулярном направлении к длине волокон, что приводит к возникновению неплотностей в сопряжениях деталей, их покоробленности в различных направлениях, растрескиванию и т. п. Вследствие этого изделие в короткий срок после изготовления резко снижает свои качественные показатели или совершенно приходит в негодность. Следовательно, повышенное содержание влаги в древесине при выработке из нее продукции недопустимо; продукция будет низкокачественной, с малым ресурсом службы. Например, мебель (решетчатая бытовая, школьная и т. п.), изготовленная из недосушенной древесины, приходит в негодность за 2—4 года; аналогичная мебель, изготовленная из хорошо высушенного материала, служит 20—40 лет и более, т. е. примерно в 10 раз дольше. Таким образом, при снабжении населения какого-либо района мебелью с низким сроком службы следовало бы в 10 раз увеличить мощность предприятий, расход материала и общую стоимость изделий.

Качественная сушка предотвращает большой ущерб в промышленности, позволяя обойтись меньшим количеством предприятий, сырья, рабочей силы и т. п. и одновременно экономить средства населения.

Деревообрабатывающие и мебельные предприятия будут работать в большой мере неэффективно, если сушка древесины на них неудовлетворительна и вырабатываемая продукция в условиях эксплуатации быстро приходит в негодность. Двери, оконные коробки, настилы полов и перекрытия, изготовленные из недостаточно просушенной древесины, через некоторое время рассыхаются, в них появляются щели; двери и дверные коробки перекашиваются, половые доски и элементы перекрытия коробятся, штукатурка разрушается, конструктивные деревянные элементы поражаются грибами и т. д. В зимнее время такая постройка, потерявшая герметичность, продувается ветром. Вскоре после сооружения ее приходится капитально ремонтировать. При появлении домовых грибов вида *Merulius Lacrymans* необходимо срочно перебирать деревянные конструкции и сжигать все пораженные детали, а иногда целиком постройки и сооружения. Влажная или недосушенная древесина часто портит соприкасающиеся или сопряженные с ней материалы, изделия или продукты. При этом убытки обычно во много раз превышают исходную стоимость древесины.

Почти все пиломатериалы следует высушивать на месте их выпилки, причем немедленно, и желательно в едином потоке с выпилкой. Процесс их сушки надо рассматривать как неотъемлемую часть технологии изготовления досок и заготовок. Недосушенную древесину нельзя считать материалом и, тем более, товарной продукцией, подлежащей реализации в отечественной промышленности.

С лесопильных заводов потребителям должна отгружаться сухая пилопродукция, так как при транспортировке влажной древесины излишне расходуются средства на перевозку громадных количеств воды, составляющей около половины массы самой древесины. Кроме того, влажная древесина в пути часто портится.

Неправильный процесс сушки приводит также к значительным убыткам из-за возникновения напряжений, коробления и трещин в материале. Недопустимо нарушение технологии сушки посредством досрочной выгрузки из камер недосушенного материала, если из-за недостатка древесины в цехе возникает простой станков. Это приводит к нерациональному ее использованию. Недовлетворительная сушка и выпуск бракованной продукции в сушильном цехе могут оставаться долгое время незамеченными, поскольку результаты дефектной сушки при отсутствии должного контроля (за неравномерностью влажности высушенного материала или его недосушкой) сказываются

через значительное время после выработки продукции, когда она оплачена потребителем и находится в эксплуатации.

Сушка обходится недорого — около 10% от стоимости высушиваемой древесины. Расходы на устройство сушильных установок за время их действия (около 10 лет) равны 1—2% от стоимости высушиваемой древесины.

5. ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ СУШКИ

Перенос тепла материалу может осуществляться: 1) газобразной средой — при сушке в воздухе, в продуктах сгорания или в перегретом паре; 2) жидкостью — при сушке в керосине, петролатуме, масле и других гидрофобных жидкостях; 3) твердым телом — при контакте с горячей металлической поверхностью; 4) лучистой теплотой — от специальных излучателей; 5) электрическим током, пропускаемым через влажную древесину и нагревающим ее; 6) электромагнитным полем высокой частоты, пронизывающим влажную древесину и нагревающим ее. Учитывая различные способы подвода тепла к высушиваемому материалу, приведем краткое описание основных способов сушки древесины, применяемых в промышленности.

При *атмосферной сушке* для испарения влаги из материала используется тепло относительно сухого атмосферного воздуха. Древесину можно сушить на корню, в бревнах, дровах, пиломатериалах и в других сортиментах. Подсушивают древесину на корню (особенно лиственницу) при подготовке ее к сплаву для уменьшения ее плотности и снижения потерь от утопа.

Атмосферной сушке древесину в бревнах, брусках, расколотых частях ствола подвергают почти во всех случаях использования этих сортиментов. Продолжительность сушки 1—3 года. Неполное удаление коры (пролысками, но лучше кольцами, что безопаснее в отношении последующего растрескивания) значительно ускоряет просыхание бревен. Радикальное средство для сокращения продолжительности сушки дров — их раскалывание и укладка в поленицы, легко продуваемые ветром. Атмосферную сушку можно ускорять, продувая воздух по материалу вентиляторами. На многих предприятиях атмосферная сушка — единственный способ понижения влажности древесины.

При *искусственной сушке*¹ древесины (конвективно-тепловой, кондуктивной, диэлектрической и др.) нагревают влажный материал (соответственно теплым воздухом, горячими плитами или электричеством) для повышения теплопроводности и давления пара в древесине с целью ускорения удаления влаги.

¹ Ранее термином «искусственная сушка» определяли только конвективно-тепловую сушку в камерах или туннелях.

Положительные особенности такой сушки — высокая интенсивность процесса, возможность его регулирования в широких пределах, достижение любой конечной влажности древесины, минимальные дефекты, возможность сушки в течение всего года независимо от состояния атмосферного воздуха, а также уничтожение грибной инфекции и насекомых в прогретой древесине. В связи с большой скоростью такой сушки излишни крупные запасы древесины, необходимые при атмосферной сушке. Поэтому технологический процесс выработки продукции на предприятии может быть организован более совершенно.

Конвективная сушка продуктами сгорания аналогична конвективной сушке воздухом. Особенности ее заключаются в подготовке и подаче к материалу в качестве газообразного сушильного агента продуктов сгорания твердого, жидкого или газообразного топлива. Сушильные установки для такого метода проще в эксплуатации и дешевле по сравнению с установками, в которых используется воздух, нагреваемый калориферами.

Конвективная сушка перегретым паром атмосферного давления также сходна по принципу действия с конвективной сушкой материала нагретым воздухом (см. рис. 1, б). Ее особенности — значительная температура сушильного агента (выше 100°C), отсутствие воздуха в камере, более интенсивный процесс сушки [4], однако прочность высушенной древесины снижается из-за перегрева.

Комбинированная сушка древесины — это обычно сочетание атмосферной и конвективно-тепловой или конвективно-тепловой и диэлектрической.

Сушка в гидрофобных жидкостях, преимущественно в петролатуме, а также в пропиточных маслах и антисептиках при консервировании характеризуется еще более высокой интенсивностью процесса, также протекающего при температурах выше 100°C . Недостатки этого способа — в необходимости пополнения петролатума, загрязнении высушенной древесины и поэтому худшей ее склейке, большей пожарной опасности. При консервировании подсушка древесины в жидких антисептиках может быть очень эффективной. Такой метод рекомендуется для высушивания строительных элементов (мостов, ферм), а также столбов, шпал и т. п., эксплуатируемых в атмосферных условиях.

Кондуктивную сушку древесины (см. рис. 1, в) применяют в фанерном, мебельном, а также в лыжном производстве (при загибе носков лыж). Процесс характеризуется высокой интенсивностью.

Радиационный нагрев применяют для поверхностной сушки деталей или изделий, например их покрытий, крашения и т. д., а также частично для сушки шпона.

Сушка с применением электрического тока и электромагнитных волн отличается тем, что материал прогревается одновременно по всей толщине, т. е. диатермически. Вследствие этого

возможна бездефектная сушка толстых сортиментов. Недостатки такой сушки — сложность установки, высокая стоимость ее устройства и эксплуатации, радиопомехи и опасность обслуживания.

Интересен метод электрической сушки в воде, слегка подкисленной, в которую погружается подлежащая обезвоживанию древесина. Пропускаемый через воду электрический ток избирательно направляется в сырую древесину, обладающую большей электропроводностью, чем вода. При этом древесина нагревается и подсушивается. Затем ее вынимают из воды. В нагретом состоянии она быстро досыхает, отдавая в окружающий воздух поверхностную влагу.

6. ЭКОНОМИКА МАССОВОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Сушить пиломатериалы целесообразно на месте их выработки, т. е. на лесопильных заводах. Это дает следующие преимущества: 1) исключается возможность порчи пиломатериалов в летнее время в пути и при хранении из-за посинения, загнивания и т. д.; 2) в значительной мере снижается масса погружаемой и транспортируемой древесины; 3) удешевляется стоимость сушки за счет использования более дешевого топлива на месте распиловки древесины и, тем более, в условиях проведения сушки большого количества пиломатериалов; 4) снижается стоимость производственных расходов по распиловке и сушке пиломатериалов, поскольку эти две технологические операции на лесопильном заводе выполняются в едином производственном потоке в отличие от разрозненного их проведения у многих потребителей пиломатериалов; 5) улучшается качество сушки древесины в условиях крупного завода, располагающего более совершенной техникой и квалифицированными кадрами, а не у отдельных, часто мелких, потребителей пиломатериалов.

Объем организованно проводимой сушки (на лесопильных заводах) должен составлять около 90% объема лесопиления. Не подвергаются высушиванию лишь пиломатериалы неотвеченного назначения, преимущественно низших сортов, которые не нуждаются в сушке по условиям их использования (например, для заборов, строительных лесов, крепления колодцев, траншей и т. д.).

Из указанного объема примерно четвертая часть пиломатериалов внутреннего рынка на лесопильных заводах должна быть подвергнута атмосферной сушке и три четверти — конвективно-тепловой. В дальнейшем, по мере усовершенствования сушильной техники и технологии деревообработки, роль и удельный объем конвективно-тепловой сушки будут повышаться.

Атмосферная сушка пиломатериалов по технико-экономическим причинам наиболее целесообразна в следующих случаях: для экспортных пиломатериалов; в южных климатических зо-

нах СССР для пиломатериалов хвойных пород, предназначенных к эксплуатации вне отапливаемых помещений, а также перед досушкой в камерах; при сезонной отгрузке пиломатериалов водным транспортом; при необходимости небольшого понижения влажности тонких пиломатериалов, особенно низкого качества; на временных небольших лесопильных заводах.

Конвективно-тепловую сушку следует применять для высушивания: пиломатериалов, которые растрескиваются при атмосферной сушке, например крупных ~~семян~~ особенно твердых пород; пиломатериалов, дальнейшая переработка которых проводится круглогодично на этих же комбинатах или на кооперированных с лесопильными заводами деревообрабатывающих предприятиях и цехах; пиломатериалов до низкой конечной влажности, недостижимой при атмосферной сушке в данных климатических условиях. В других случаях при выборе способа сушки надо учитывать местные условия, в первую очередь производственную необходимость.

Основной промышленный способ высушивания пиломатериалов — конвективно-тепловая сушка. Значение этого способа будет непрерывно возрастать по мере удорожания древесины, технического развития деревообработки и выпуска с лесопильного завода более качественной продукции. Строятся лесокombинаты, которые в зимнее время должны высушивать основное количество пилопродукции. При этом изменяется как профиль, так и технологическая схема предприятия.

Допускается последовательно двойная конвективно-тепловая сушка пиломатериалов: первый этап (до влажности 12—15%) — на лесопильном заводе, второй — при необходимости у потребителя. Однако это целесообразно лишь в условиях выпуска лесозаводом обезличенных товарных пиломатериалов, поступающих не известным заранее потребителям. Желательно кооперирование крупных предприятий потребителей с лесопильным заводом для выработки прирезных пиломатериалов и заготовок целевого назначения, высушенных однократно до требуемой конечной влажности.

Практически установлено, что высушенные заготовки и детали можно длительно транспортировать в крытых железнодорожных вагонах без заметного изменения влажности древесины. Можно считать, что доски, высушенные до требуемой потребителем конечной влажности (например, строительные пиломатериалы), в весенне-летнее и зимнее время можно транспортировать также на открытых платформах, если верхние ряды их будут уложены так, чтобы они выполняли роль временной крыши. При этом, как правило, не возникает необходимости во вторичной сушке доставленных потребителю пиломатериалов.

При атмосферном подсушивании пиломатериалов и досушке их в камерах качество изделий повышается. Такая комбина-

рованная сушка желательна во многих производствах, в первую очередь при изготовлении мебели, моделей и аналогичной ответственной продукции.

Для строителей предварительная подсушка древесины на лесопильных заводах также желательна, если она выполняется способом атмосферной сушки. Однако лучше, если этот основной потребитель, забирающий около половины всех пиломатериалов, вырабатываемых в стране, будет получать с лесопильных заводов древесину, окончательно высушенную тем или другим способом до нужной конечной влажности.

ГЛАВА 2. СВОЙСТВА ВОДЯНОГО ПАРА И ВОЗДУХА КАК СУШИЛЬНЫХ АГЕНТОВ (ТЕРМОДИНАМИКА СУШКИ)

7. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЯНОГО ПАРА (ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ)

Общие свойства пара

Водяной пар участвует в сушильных процессах в виде теплоносителя и сушильного агента, а именно: 1) пара-теплоносителя, поступающего из котла в калорифер паровых сушильных камер для их нагревания; 2) пара, поступающего из котла в рабочее пространство сушильной камеры и добавляемого к воздуху для его увлажнения с целью образования сушильного агента; 3) пара — сушильного агента, заполняющего сушильную камеру (с вытеснением из нее воздуха) и в перегретом состоянии испаряющего из древесины влагу; 4) пара, выделяющегося из высушиваемого материала в результате испарения из него влаги; 5) пара, выделяющегося в топке из сжигаемого топлива при испарении его физической влаги, а также сгорании водорода топлива с образованием водяного пара; этот пар поступает с продуктами сгорания в сушильную камеру к материалу, создавая сушильный агент.

Все эти виды пара характеризуются общими физическими свойствами, но отличаются между собой по давлению, степени перегрева и количеству воздуха (или продуктов сгорания) в смеси с паром.

Характерное состояние пара — *сухой насыщенный*, находящийся в фазовом равновесии с водой или со льдом; сухой насыщенный пар бесцветен и прозрачен (т. е. невидим).

Каждому давлению сухого насыщенного пара соответствует определенная его температура и наоборот. В атмосферной среде и в сушильных камерах по замеренной температуре, с помощью таблиц или графиков, обычно устанавливают давление

пара, а в паровых котлах и калориферах — по давлению находят температуру насыщенного пара.

Сухой насыщенный пар будет *перегретым*, если его нагревать при постоянном давлении. Разность температур перегретого (точка *E* на рис. 3, б) и насыщенного пара (точка *K*)

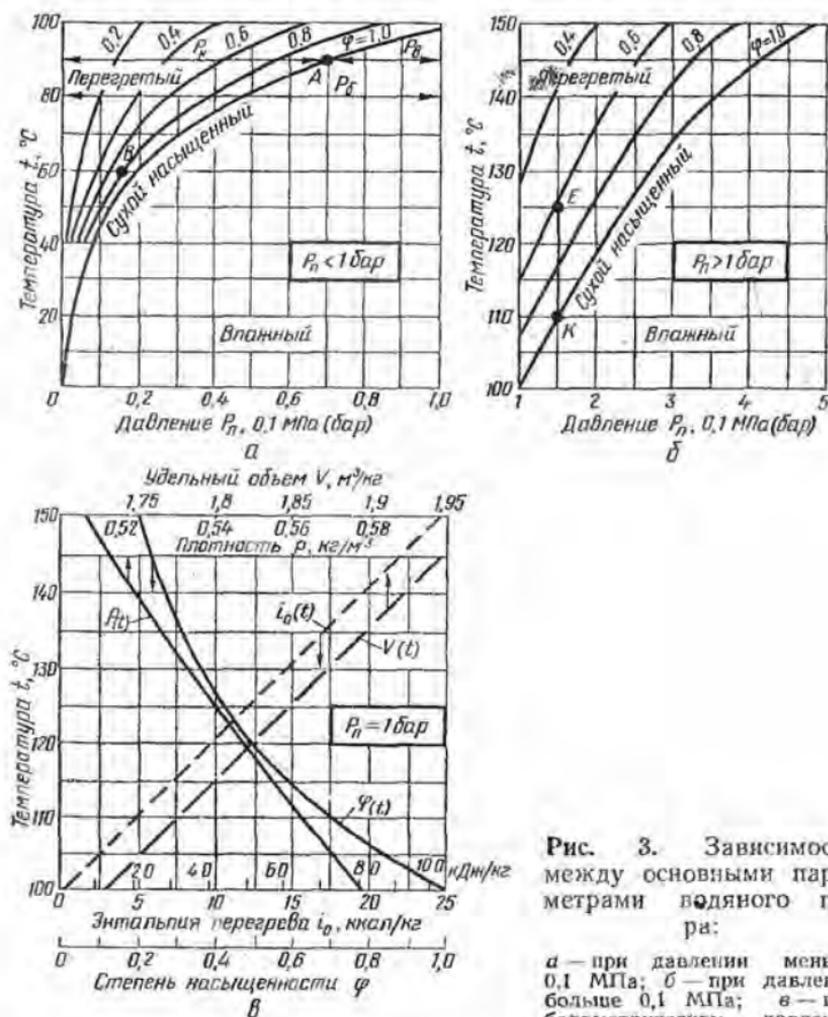


Рис. 3. Зависимость между основными параметрами водяного пара:

а — при давлении меньше 0,1 МПа; б — при давлении больше 0,1 МПа; в — при барометрическом давлении

называется *температурой перегрева* (отрезок *EK*, соответствующий $125 - 110 = 15^\circ\text{C}$). Перегретый пар любого давления способен испарять воду из материала, пока не станет насыщенным. Именно это свойство пара используется для сушки материала как в цилиндрах под избыточным давлением и в камерах при атмосферном давлении, так и на открытом воздухе. Если при постоянном давлении охлаждать безотносительно чистый перегретый пар или в смеси с воздухом, при *температуре точки росы* пар станет сухим насыщенным, а при дальнейшем охлаждении

дени часть его превратится в воду в виде росы или взвешенных капелек воды диаметром 1—10 мкм. Такая конденсация находящегося в воздухе пара часто наблюдается в виде тумана в коридорах управления сушильных установок, особенно в условиях добавки холодного воздуха. Пар, содержащий капельки воды, белый (молочного цвета) непрозрачный называется *влажным паром*. Количество воды в нем обозначают термином *влажность пара*, однако более точным будет термин *водность* пара, поскольку сам пар является влагой, а туман (в том числе облако) представляет собой взвешенные в воздухе капельки воды, рассеивающие свет.

Давление пара

Величину давления пара в атмосферном воздухе можно наглядно иллюстрировать следующим опытом. Если в трубку ртутного барометра снизу впустить пипеткой несколько капель воды, всплывающей кверху, через некоторое время уровень ртути в барометре понизится из-за образования в торричеллиевой пустоте водяного пара. Последний создает свое парциальное давление p_n , действующее равномерно во все стороны, в том числе и на понижающуюся поверхность ртути.

При проведении аналогичного опыта в условиях с большей температурой пара в трубке барометра значение p_n увеличится (на поверхности ртути должно оставаться немного воды). Такие опыты показывают на повышение давления насыщенного пара с возрастанием его температуры. При температуре пара в трубке 100°С уровень ртути в ней опустится до ее уровня в чашке барометра, так как давление пара будет равно атмосферному давлению. Этим методом изучают функциональную зависимость между указанными параметрами пара (табл. 1).

Давление пара, как и всякого газа, может быть выражено в паскалях.

Временно допускается измерение давлений:

а) в миллиметрах водяного столба (так как 1 л, т. е. 1 кг воды, равномерно разлитой на площади 1 м², образует толщину слоя в 1 мм, создавая давление 1 кгс/м²); эта величина удобна для измерения простыми жидкостными приборами давления (разрежения) воздуха в воздуховодах, штабелях материала и т. п. (приближенно 1 мм вод. ст. = 10 Па, точнее — 9,81 Па);

б) в технических атмосферах (кгс/см²), что составляет высоту напора 10 м, т. е. 10 000 мм водяного столба, или 98 066 Па, т. е. достаточно точно 0,0981 МПа;

в) в барах (10⁵ Па, т. е. 0,1 МПа) соответственно среднему барометрическому давлению на высоте около 100 м над уровнем моря; 1 бар равен 750,062 (округленно 750) мм рт. ст. или 10 197,2 (округленно 10 200) мм вод. ст. 1 бар соответствует 1,02 кгс/см²; таким образом, обе эти величины

I. Параметры сухого насыщенного пара [5]

Давление, МПа (кгс/см ²)	Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Объем, м ³ /кг	Теплота паро- образования, кДж/кг (ккал/кг)	Энтальпия, кДж/кг (ккал/кг)
0,001 (0,0102)	6,9	0,0077	129,3	2484 (593,5)	2514 (600,4)
0,002 (0,0204)	17,5	0,0149	66,97	2460 (587,6)	2533 (605,1)
0,005 (0,051)	32,9	0,0355	28,19	2423 (578,9)	2561 (611,7)
0,01 (0,102)	45,8	0,0681	14,68	2393 (571,6)	2584 (617,2)
0,02 (0,204)	60,1	0,131	7,65	2358 (563,4)	2609 (623,3)
0,05 (0,51)	81,3	0,309	3,242	2305 (550,7)	2646 (631,8)
0,10 (1,02)	99,6	0,590	1,694	2258 (539,6)	2675 (639,0)
0,12 (1,22)	104,8	0,700	1,429	2244 (536,3)	2684 (640,9)
0,14 (1,43)	109,3	0,809	1,236	2232 (533,4)	2691 (642,5)
0,16 (1,63)	113,3	0,916	1,091	2221 (530,8)	2697 (643,4)
0,18 (1,84)	116,9	1,023	0,977	2211 (528,5)	2702 (645,5)
0,20 (2,04)	120,2	1,129	0,885	2202 (526,4)	2707 (646,7)
0,25 (2,55)	127,4	1,392	0,718	2182 (521,5)	2717 (649,1)
0,30 (3,06)	133,5	1,651	0,606	2164 (517,3)	2725 (651,0)
0,35 (3,57)	138,9	1,908	0,524	2148 (513,5)	2732 (652,7)
0,4 (4,08)	143,6	2,163	0,462	2134 (510,2)	2738 (654,2)
0,45 (4,60)	147,9	2,416	0,414	2121 (507,1)	2744 (655,5)
0,5 (5,10)	151,8	2,669	0,375	2108 (504,2)	2749 (656,7)
0,6 (6,11)	158,8	3,169	0,316	2086 (498,9)	2756 (658,7)
0,7 (7,14)	165,0	3,666	0,273	2066 (494,2)	2763 (660,3)
0,8 (8,16)	170,4	4,161	0,240	2047 (489,8)	2768 (661,5)
0,9 (9,18)	175,3	4,654	0,215	2030 (485,8)	2773 (662,7)
1,0 (10,20)	179,9	5,139	0,1946	2014 (482,1)	2777 (663,7)
1,2 (12,24)	188,0	6,124	0,1633	1985 (475,1)	2783 (665,3)
1,5 (15,30)	198,3	7,593	0,1317	1946 (465,9)	2790 (667,1)
2,0 (20,40)	212,4	10,04	0,0996	1889 (452,6)	2797 (668,9)
2,5 (25,50)	223,9	12,50	0,0799	1839 (439,0)	2801 (670,0)

близки между собой (отличаются на 2%). Эта единица применяется в метеорологии, следовательно учитывается в условиях атмосферной сушки древесины.

При проведении измерений и расчетов в лесосушильной технике отсчитывают давление пара от нулевого значения давлений. Иногда за начало отсчета давлений принимают избыточное против барометрического. Первое больше второго на 0,1 МПа. Например, 0,6 МПа будет соответствовать 0,5 МПа, отсчитанным по манометру на паровом котле или паропроводе (соответственно 6 и 5 кгс/см²).

Уравнение состояния и степень насыщенности пара

По физическим свойствам перегретый пар близок к идеальным газам и подчиняется уравнению состояния газов Менделеева — Клапейрона, которое для 1 кг пара имеет вид

$$p_n V_n = R_n T, \quad (1)$$

где p_n — давление пара, Па ($\text{кгс}/\text{м}^2$); V_n — объем 1 кг пара, м^3 ; T — абсолютная температура, К; R_n — газовая постоянная пара, равная $462 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ [$47,1 \text{ кгс} \cdot \text{м}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$].

Выражая объем пара V_n через его плотность ρ_n ($\text{кг}/\text{м}^3$), из соотношения $\rho_n = 1/V_n$ получим

$$p_n = p_n' R_n T = p_n' [R_n (273,15 + t)], \quad (2)$$

где t — температура (в технических расчетах $T = 273 + t$), $^\circ\text{C}$.

Пример. При давлении пара $p_n = 0,1 \text{ МПа} = 10\,200 \text{ кгс}/\text{м}^2$ и температуре $t = 130^\circ\text{C}$ плотность перегретого пара составит

$$\begin{aligned} \rho_n &= 10^5 / [462 (273 + 130)] = 10\,200 / [47,1 (273 + 130)] = \\ &= 0,536 \text{ кг}/\text{м}^3, \end{aligned}$$

а объем 1 кг пара $V_n = 1/\rho_n = 1,90 \text{ м}^3/\text{кг}$, т. е. в 1900 раз больше объема 1 кг воды.

Как и для других газов, теплоемкость пара возрастает с повышением температуры. В небольшом диапазоне температур $100\text{—}150^\circ\text{C}$ при постоянном давлении она может быть в среднем принята $2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ [$0,48 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$]. Энтальпия сухого насыщенного пара при давлении $0,1 \text{ МПа}$ и температуре $99,6^\circ\text{C}$ составляет $2675 \text{ кДж}/\text{кг}$ ($639,0 \text{ ккал}/\text{кг}$) (см. табл. 1).

Для перегретого пара, подчиняющегося уравнению (1), применительно к условиям сушки, в том числе для выявления гигроскопических характеристик материалов, высушиваемых в среде перегретого пара, желательнее ввести параметр — степень насыщенности пара или, более кратко, насыщенность пара φ , получаемую из соотношения

$$\varphi = \rho_n / \rho_n' \approx p_n / p_n', \quad (3)$$

где ρ_n — плотность перегретого пара, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_n' — плотность насыщенного пара при той же температуре, $\text{кг}/\text{м}^3$; p_n — давление перегретого пара; p_n' — давление насыщения при той же температуре.

Для перегретого пара барометрического давления, при $t > 99,6^\circ\text{C}$, применяемого в сушильных камерах, когда $p_n = 1 \text{ бар}$, формула (3) примет вид: $\varphi = 1/\rho_n$ (здесь ρ_n также в барах).

Температуру насыщения как функцию давления пара находят из табл. 1. Этот параметр справедлив для любого давления пара, вплоть до критического. На рис. 3, а показана графическая зависимость между температурой и давлением насыщенного пара (правая кривая $\varphi=1,0$), а также зависимость $t(p_n, \varphi)$ для перегретого пара, когда $\varphi < 1,0$, при давлениях $p_n \leq 0,1$ МПа (1 бар). Эта зависимость сохраняется и в присутствии воздуха, характеризующегося своим давлением. Например, в сушильных камерах, при $t=90^\circ\text{C}$ и $\varphi=1,0$ выявлена величина $p_n = 0,07$ МПа. Следовательно, давление воздуха p_v будет соответствовать величине, недостающей до 0,1 МПа, т. е. будет составлять $p_v = 0,03$ МПа (точка А на рис. 3, а); при $t=60^\circ\text{C}$ и $\varphi=0,8$ будет $p_n = 0,016$ и $p_v = 0,084$ МПа (точка В).

На рис. 3, б аналогичная зависимость $t(p_n, \varphi)$ показана для пара давлением выше барометрического. Изобарный процесс нагревания или охлаждения пара изобразится на этих диаграммах вертикальным отрезком.

Применительно к условиям сушки древесины перегретым паром барометрического давления графическая взаимозависимость между параметрами пара как сушильного агента изображена на рис. 3, в. На оси ординат нанесена температура пара $t^\circ\text{C}$. Отсчитывают: температуру перегрева ($t-100^\circ\text{C}$), степень насыщенности φ , плотность ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$), удельный объем $V=1/\rho$ ($\text{м}^3/\text{кг}$) и энтальпию перегрева i_0 [$\text{кДж}/\text{кг}$ ($\text{ккал}/\text{кг}$)].

Приближенную зависимость $t(p_n)$ для насыщенного пара в диапазоне температур $90-250^\circ\text{C}$ можно принять по формуле Руша [5]:

$$t = 100 \sqrt[4]{p_n} \quad \text{или} \quad p_n = (t/100)^4. \quad (4)$$

Здесь p_n выражено в килограмм-силе на квадратный сантиметр.

Подставляя в (4) значение p_n из (3), получим для перегретого пара барометрического давления:

$$p_n = \varphi (t/100)^4 = 1,0. \quad (5)$$

Отсюда
$$\varphi = (100/t)^4. \quad (6)$$

Этому соотношению в диапазоне температур $100-150^\circ\text{C}$ соответствует кривая $\varphi(t)$ на диаграмме рис. 3, в. Из диаграммы видно, что состояние перегретого пара барометрического давления однозначно определяется температурой t и любым из следующих параметров: степенью насыщенности φ , энтальпией перегрева i_0 , плотностью ρ_n или удельным объемом V . Величина температуры перегрева определится $t-100^\circ\text{C}$ (точнее $t-99,6^\circ\text{C}$). При добавке воздуха или уменьшении атмосферного давления ниже 0,1 МПа температура перегрева (при $t=\text{const}$) возрастает.

Расчет параметров перегретого пара как сушильного агента

Энтальпия 1 кг пара i барометрического давления, выделяющегося из высушиваемого материала (с учетом температуры $t_1 > 100^\circ\text{C}$ при испарении свободной влаги), будет равна

$$\begin{aligned} i &= i' + r + c_n(t_1 - 100) = \\ &= 419 + 2257 + 2,0(t_1 - 100) \text{ кДж/кг,} \end{aligned} \quad (7)$$

где i' — энтальпия жидкости при температуре кипения; c_n — изобарная теплоемкость пара [5]; r — теплота парообразования (находится из табл. 1).

Уменьшение энтальпии перегретого пара (как сушильного агента), при понижении его температуры в штабеле материала с t_1 до t_2 в результате передачи им тепла древесине на испарение влаги, составит

$$\Delta_i = 2,0(t_1 - t_2) \text{ кДж/кг.} \quad (8)$$

Тогда количество l сушильного агента, необходимое для испарения из материала 1 кг влаги, будет

$$l = \frac{i - 100}{\Delta_i} = \frac{2675 + 2(t_1 - 100) - 100}{2(t_1 - t_2)} = \frac{1022 + t_1}{t_1 - t_2} \text{ кг/кг.} \quad (9)$$

Расчетная формула получена в простом виде — только в зависимости от начальной t_1 (до материала) и конечной t_2 (после материала) температуры сушильного агента.

Пример. Пусть $t_1 = 115^\circ\text{C}$ и $t_2 = 110^\circ\text{C}$. Тогда по уравнению (9) получим: $l = (1022 + 115)/(115 - 110) = 227$ кг пара на 1 кг влаги. Обратная величина $1/l$ из (9) покажет количество влаги, испаряемой 1 кг сушильного агента. Эта величина при измерении влаги в граммах будет

$$d' = \frac{1000(t_1 - t_2)}{1022 + t_1} = \frac{t_1 - t_2}{1,022 + 0,001t_1} \text{ г/кг.} \quad (10)$$

Если числитель правой части этого уравнения принять равным единице, в адиабатном процессе получим количество испаряемой влаги в граммах на 1°C понижения температуры сушильного агента. Эта величина — исходная для установления допустимой разности температур в штабеле пиломатериала и выявления желательного количества сушильного агента, циркулирующего по материалу. С учетом удельного объема V (табл. 2) определим скорость сушильного агента по материалу.

2. Параметры перегретого водяного пара при давлении $p_0=0,1$ МПа (1,02 кгс/см²)

Температура пара t_1 , °С	Температура перегрева Δt , °С	Степень насыщенности φ	Плотность ρ , кг/м ³	Удельный объем $V=1/\rho$, м ³ /кг	Энтальпия пара i , кДж/кг (ккал/кг)	Энтальпия перегрева пара i_0 , кДж/кг (ккал/кг)
99,6	0	1,000	0,590	1,695	2675 (639,0)	0,0 (0,0)
100	0,4	0,992	0,589	1,697	2676 (639,2)	0,8 (0,2)
102	2,4	0,916	0,586	1,709	2679 (640,2)	5,0 (1,2)
105	5,4	0,814	0,581	1,722	2683 (641,7)	11,3 (2,7)
110	10,4	0,677	0,573	1,746	2691 (644,2)	21,8 (5,2)
115	15,4	0,566	0,565	1,770	2698 (646,6)	31,8 (7,6)
120	20,4	0,477	0,557	1,794	2706 (649,0)	41,9 (10,0)
125	25,4	0,405	0,550	1,818	2713 (651,4)	51,9 (12,4)
130	30,4	0,346	0,543	1,842	2721 (653,8)	62,0 (14,8)
135	35,4	0,298	0,536	1,866	2727 (656,2)	72,0 (17,2)
140	40,4	0,258	0,529	1,890	2734 (658,5)	81,7 (19,5)
145	45,4	0,224	0,522	1,914	2740 (661,8)	91,4 (21,8)
150	50,4	0,196	0,515	1,938	2746 (663,1)	101,0 (24,1)

Приращение влагосодержания d' (г/кг) сушильного агента при снижении в штабеле материала его температуры на 1°С ($t_1-t_2=1$) будет равно

$$d' = 1000/(1022 + t_1). \quad (11)$$

Как видно, величина d' близка к единице, т. е. на каждый градус падения температуры сушильного агента испаряется из материала примерно 1 г влаги. Точнее в диапазоне температур 100—150°С эта величина составит 0,90—0,86°С на 1 г влаги. Расчет процесса испарения влаги перегретым паром может проводиться также с использованием термодинамических диаграмм TS и iS с последующей разработкой соответствующих инженерных решений.

9. СОСТОЯНИЕ И ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУХА КАК СУШИЛЬНОГО АГЕНТА

Состояние воздуха

Воздух как рабочее вещество — *сушильный агент* широко применяется в промышленной сушке древесины. Он выполняет роль транспортного средства — подводит к влажному материалу тепло и в соответствующем количестве отбирает из материала и уносит влагу.

В технической литературе иногда вместо термина воздух применяют термин влажный воздух (humidity air — англ. или feuchte Luft — нем.). Такой термин и следующее из него понятие нельзя считать правильными. В природе и технике воздух всегда содержит в различных количествах водяной пар. Поэтому упоминать о паре каждый раз, называя воздух «влажным», неправильно и даже противоречиво. Воздух часто бывает очень сухим, например летом в пустыне или в зимнее время в комнатах с паровым отоплением. В таких условиях принято говорить *воздух сухой*, а не *влажный воздух сухой*.

Добавление влажный будет обоснованным, когда воздух действительно влажен (состояние тумана), а в бытовых условиях — содержит избыточное количество пара, больше нормы, допустимой санитарными требованиями.

То же относится к однокомпонентному пару, когда влажным правильно называют пар, содержащий взвешенные капельки воды, а также к высушиваемому материалу, который, будучи влажным, содержит свободную влагу. Если воздух и материал не содержат влаги, их называют *абсолютно сухими*.

Химический состав абсолютно сухой части воздуха в природных условиях практически постоянен и составляет по объему около 21% кислорода, 78% азота и 1% инертных газов. Такой воздух по физическим свойствам близок к идеальным газам и с небольшими отклонениями, не имеющими в сушильной технике практического значения, подчиняется уравнению состояния газов Менделеева—Клапейрона (для 1 кг воздуха):

$$p_v V_v = R_v T, \quad (12)$$

где p_v — давление воздуха, Па (кгс/м²); V_v — объем воздуха, м³/кг; R_v — газовая постоянная абс. сух. воздуха, равная 287,14 Дж/(кг·К) [29,27 кгс·м/(кг·°C)].

Так как $V_v = 1/\rho_v$, плотность воздуха ρ_v (кг/м³) будет

$$\rho_v = p_v / R_v T = p_v / 287 (273 + t). \quad (13)$$

При атмосферном давлении 0,1 МПа (750 мм рт. ст.) и 20°C плотность абс. сух. воздуха $\rho_v = 100000 / (287 \cdot 293) = 1,19$ кг/м³.

Закон Дальтона устанавливает, что барометрическое давление воздуха складывается из парциальных (parts — часть по-латыни) давлений абс. сух. части воздуха p_v и находящегося в гомогенной смеси с ним водяного пара p_n (см. рис. 3, а)

$$p = p_v + p_n \quad (14)$$

откуда $p_v = p - p_n$, т. е. давление абс. сух. части атмосферного воздуха p_v при постоянном барометрическом давлении p будет тем меньше, чем больше давление пара p_n ; при насыщенном состоянии пара $p = p_v + p_n$.

Рассмотрим основные параметры воздуха, проявляющиеся при конвективной сушке материала.

Температура воздуха определяет степень его нагрева.

Давлением воздуха называют гидростатическое упругое воздействие, оказываемое воздухом на находящиеся в нем тела.

Абсолютной влажностью воздуха (точнее, пространства) в сушильной технике называют количество граммов пара, содержащегося в 1 м^3 пространства. По количественному значению абсолютная влажность равна *плотности пара* ($1000 \rho_n$), выраженной в граммах на 1 м^3 . Таким образом, абсолютная влажность определяется параметрами t , φ и не зависит от давления абс. части воздуха.

Влагоемкость пространства (независимо от присутствия или давления воздуха) — количество граммов сухого насыщенного пара в 1 м^3 пространства при данной температуре, что численно соответствует $1000 \rho_n$. С повышением температуры влагоемкость возрастает и наоборот. Это очень важное свойство пара, находящегося в воздухе, а равно и без воздуха — увеличивать влагоемкость пространства в результате подогрева — лежит в основе процесса сушки. Холодный атмосферный воздух (а следовательно, пар в нем), даже пересыщенный влагой (туман), содержит малое количество пара. Влагоемкость пространства $1000 \rho_n$ (г/м^3) зависит от температуры t ($^\circ\text{C}$):

t	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$1000 \rho_n$	0,29	0,81	2,1	4,8	9,4	17,3	30,4	51,1	83,0	130	198	293	423	598

Как видно из этих цифр, влагоемкость примерно удваивается при повышении температуры на каждые 10°C .

При охлаждении часть насыщенного пара конденсируется. Уменьшение влагоемкости пространства с понижением температуры пара часто используется в технике для осушения воздуха, например при его кондиционировании, т. е. приготовлении и поддержании воздуха заданных параметров.

Так как давление и плотность отдельных газов в общем их объеме, по закону Дальтона, не зависят от присутствия в этом объеме других газов, при $t = \text{const}$ плотность насыщенного пара в воздухе и в безвоздушном пространстве (чистый пар) будет одинаковой. Поэтому влагоемкость пространства, занятого воздухом, показывает одновременно плотность чистого насыщенного пара при той же температуре.

Степень насыщенности пара (насыщенность пара) φ в воздухе будет такой же, как и без воздуха. Определяют ее по уравнению (3), являющемуся отношением абсолютной влажности к влагоемкости. Этот метеорологический параметр иногда не-

правильно называют в технике *относительной влажностью воздуха*. В настоящем определении параметр φ справедлив для однокомпонентного пара и в среде CO_2 , CO и других газов или без них, в том числе и без сухой части воздуха, так как характеризует только свойство пара. Если приравнять свойства пара к свойствам идеальных газов [см. (3)], когда плотность пропорциональна давлению, можно записать также и для пара в воздухе

$$\varphi = p_n/p_n \approx p_n/p_n.$$

При $p_n=0$ будет $\varphi=0$ (абс. сух. воздух, пар отсутствует). При $p_n=p_n$ будет $\varphi=1$ (насыщенный пар в воздухе). Отсюда $p_n=\varphi p_n$. Иногда насыщенность пара в воздухе выражают в процентах:

$$\varphi = 100 p_n/p_n \approx 100 p_n/p_n.$$

В воздухе может находиться пар любой другой жидкости. Тогда параметр φ определит степень насыщенности пара этой жидкости (спирта, эфира и др.) и также будет изменяться от 0 до 1 в соответствии с закономерностями p_n и p_n для такой жидкости.

Влагосодержание воздуха d (г/кг абс. сух. воздуха) определяется массой пара G_n (г), отнесенной к 1 кг абс. сух. воздуха G_b (кг) в общем их объеме:

$$d = 1000 G_n/G_b = 1000 p_n/p_b, \quad (15)$$

где p_n — плотность пара, кг/м^3 ; p_b — плотность абс. сухого воздуха, кг/м^3 .

Согласно уравнениям (2) и (13) (г/кг) равно

$$\begin{aligned} d &= 1000 p_n/p_b = 1000 \frac{p_n}{R_n T} / \frac{p_b}{R_b T} = 1000 p_n R_b / p_b R_n = \\ &= 622 p_n/p_b = 622 p_n/(p - p_n). \end{aligned} \quad (16)$$

Отношение $R_b/R_n=287/462=0,622$.

С учетом соотношения (3) уравнение (16) примет вид

$$d = 622 \varphi p_n/(p - \varphi p_n) = 622 p_n/(p - p_n). \quad (17)$$

Из уравнения (16) имеем

$$p_n = p d / (622 + d). \quad (18)$$

Иногда влагосодержание выражают в килограммах пара на 1 кг абс. сух. воздуха (X , кг/кг воздуха)

$$X = G_n/G_b = 0,622 p_n/p_b. \quad (19)$$

Из уравнений (16) и (18) видно, что при постоянном атмосферном давлении ($p = \text{const}$) влагосодержание воздуха зависит только от давления пара p_n . В случае повышения барометрического давления p при $p_n = \text{const}$ влагосодержание d падает, и, наоборот, в вакууме, если $p = p_n$, получим $d = \infty$.

Влагосодержание относится к 1 кг абс. сух. воздуха, поэтому масса воздуха с паром больше 1 кг. Например, при влагосодержании $d = 75$ г/кг масса воздуха будет $1 + (d/1000) = 1,075$ кг. Далее указание о массе абсолютно сухого воздуха (1 кг) в знаменателе уравнения (15) для краткости опускаем.

Иногда применяют параметр ψ — степень насыщения воздуха в виде отношения влагосодержания воздуха d к его влагосодержанию в состоянии насыщения d_n при данной температуре [6]:

$$\psi = d/d_n. \quad (20)$$

Величина ψ меньше величины ϕ , однако при невысоких температурах (до 50°C) $\psi \approx \phi$.

Параметр *влагосодержание воздуха* удобен для расчета и анализа процесса сушки, поскольку пар, изменяющийся количественно при выделении влаги из материала во время сушки, относится к *неизменной* массе абсолютно сухого воздуха. Существенно также, что масса этого воздуха в отличие от объема не зависит от температуры, которая изменяется при протекании сушильного процесса. Значения d (t , ϕ) приведены в табл. 3.

Энтальпия (ранее теплосодержание) воздуха складывается из энтальпии абсолютно сухой его части и энтальпии содержащегося в нем пара. Средняя изобарная теплоемкость абс. сух. воздуха c_n при $0-150^\circ\text{C}$ может быть принята 1 кДж/(кг·К) [$0,24$ ккал/(кг·°С)]. Его энтальпия будет

$$i_n = c_n t = 1,0t \text{ кДж/(кг·К)} = 0,24t \text{ ккал/(кг·°С)}. \quad (21)$$

Энтальпия водяного пара, приходящаяся на 1 кг абс. сух. воздуха, составит

$$i_n = 0,001d(r + c_n t), \quad (22)$$

где r — скрытая теплота парообразования, при $t = 0^\circ\text{C}$ равная 2500 кДж/кг (597 ккал/кг); c_n — средняя теплоемкость пара, при переменном его давлении и объеме в условиях сушки равная $1,9$ кДж/(кг·К) [$0,44$ ккал/(кг·°С)] [7], [8].

Величина $0,001d \cdot 1,9t$ (кДж/кг) [$0,001d \cdot 0,44t$ (ккал/кг)] показывает физическую теплоту нагревания 1 кг пара от 0°C до $t^\circ\text{C}$.

По правилу аддитивности энтальпия воздуха I [кДж/кг (ккал/кг)], отнесенная к неизменной его массе (1 кг абс. сух.

3. Влагододержание воздуха d , г/кг, при различной температуре t , степени насыщенности φ и общем давлении $p=0,1$ МПа (1 бар)

$t, ^\circ\text{C}$	Степень насыщенности пара в воздухе, φ											$p_{\text{H}}, \text{МПа}$
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	
-30	0,23	0,21	0,18	0,16	0,14	0,11	0,09	0,07	0,05	0,02	0,01	0,000037
-20	0,64	0,58	0,51	0,45	0,38	0,32	0,26	0,19	0,13	0,06	0,03	0,000103
-10	1,62	1,46	1,29	1,13	0,97	0,81	0,65	1,48	0,32	0,16	0,08	0,000259
0	3,82	3,44	3,05	2,67	2,29	1,90	1,52	0,14	0,76	0,38	0,19	0,000611
10	7,73	6,95	6,17	5,40	4,62	3,85	3,07	2,29	1,52	0,76	0,38	0,001227
20	14,90	13,38	11,86	10,33	8,84	7,35	5,87	4,39	2,92	1,46	0,73	0,002337
30	27,50	24,65	21,02	19,02	16,23	13,46	10,73	8,02	5,32	2,65	1,32	0,004242
40	49,5	44,15	39,00	33,85	28,80	23,80	18,90	14,05	9,33	4,63	2,31	0,007375
45	66,0	58,8	51,7	44,65	37,85	31,30	24,75	18,38	12,12	6,03	3,00	0,009582
50	87,2	77,8	68,9	58,9	49,65	40,95	32,30	23,90	15,75	7,75	3,88	0,012335
55	116,0	102,6	89,8	77,2	65,0	53,2	41,80	30,85	20,22	9,94	4,89	0,015740
60	155	135,9	117,8	100,7	84,5	69,0	54,0	39,5	25,80	12,65	6,26	0,019919
65	208	181	155	131,9	109,7	88,9	69,1	50,5	32,73	15,95	7,90	0,025008
70	282	240	206	174	143,0	114,9	88,5	64,5	41,35	19,91	9,76	0,031161
75	390	330	277	230	187	148,2	113,2	81,2	51,85	25,45	12,22	0,038548
80	560	460	380	309	248	193	145,1	103,0	64,9	30,85	14,91	0,047359
85	853	676	534	423	331	252	187	130,8	81,5	38,25	18,42	0,057803
90	1460	1060	794	599	452	335	242	165,2	101,1	46,80	22,60	0,070108
95	3400	1970	1295	876	639	454	317	211	126,3	57,30	27,35	0,086525

$t, ^\circ\text{C}$	Степень насыщенности пара в воздухе, φ											$p_n, \text{МПа}$
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	
99,63	∞	5600	2450	1455	936	622	415	266,5	155,5	69,1	32,80	0,10000
105	—	—	17 900	3420	1640	955	580	352	198	84,8	39,80	0,12080
110	—	—	—	—	3855	1575	839	481	250	103,8	47,2	0,14326
115	—	—	—	—	—	3400	1257	639	317	126,3	57,3	0,16905
120	—	—	—	—	—	83 500	2410	915	410	154,1	68,5	0,19854
125	—	—	—	—	—	—	8080	1420	540	187,9	81,7	0,23209
130	—	—	—	—	—	—	—	2660	731	230	97,2	0,27012

Примечание. В последней графе показано с высокой точностью давление пара p_n при $\varphi=1,0$ и тех же значениях температуры.

его части), определится суммой величин из соотношений (21) и (22):

$$I = 1,0t + 2,5d + 0,0019td \text{ или} \\ I = 0,24t + 0,597d + 0,00044td. \quad (23)$$

Плотность воздуха при атмосферном давлении p складывается из плотности l м³ абс. сух. воздуха, находящегося под давлением $p_v = p - p_n$, и плотности пара в том же объеме с его давлением $p_n = p - p_v$ согласно (2) и (13):

$$\rho = \rho_v + \rho_n = \frac{p_v}{R_v T} + \frac{p_n}{R_n T}. \quad (24)$$

Упростив это уравнение, получим (при давлении в паскалях)

$$\rho = \frac{0,00349p - 0,00132p_n}{273 + t} = 0,001 \frac{3,49p - 1,32p_n}{273 + t}. \quad (25)$$

Отсюда видно, что при постоянном атмосферном давлении сухой воздух (при $p_n = \varphi p_n \approx 0$) тяжелее влажного (исчезает отрицательный член в числителе). Такой же вывод можно сделать из сопоставления (2) и (13), поскольку в знаменателе $R_n > R_v$. Если в уравнении (25) давление пара заменить влагосодержанием d из (18), то для барометрического давления $p = 0,1$ МПа (бар) получим

$$\rho = \left(349 - 132 \frac{d}{622 + d} \right) / (273 + t). \quad (26)$$

Здесь плотность атмосферного воздуха (кг/м³) показана функцией его влагосодержания d и температуры t .

Объем воздуха на 1 кг абс. сухой его части необходимо знать в тех случаях, когда по t и p_n или по t и d нужно установить объем воздуха (расчет производительности вентиляторов, сечений каналов и др.).

Масса воздуха, отнесенная к 1 кг абс. сух. его части, составляет $1 + 0,001$ кг. В соответствии с уравнением Дальтона (14) смесь занимает тот же объем при суммарном ее давлении p , что и абсолютно сухой воздух при давлении p_v или водяной пар в этом объеме смеси при давлении p_n . Поэтому для объема смеси, находящейся под давлением $p = p_n + p_v$, в которую входит 1 кг абс. сух. воздуха и $0,001 d$ кг пара, напомним

$$V_{1+0,001d} = \frac{R_v T}{p_v} = \frac{R_n T}{p_n} 0,001d. \quad (27)$$

Подставив p_n из (18), получим для постоянного барометрического давления 0,1 МПа (1 бар):

$$V_{1+0,001d} = 4,62 \cdot 10^{-6} T (622 + d) \text{ м}^3/\text{кг абс. сух. воздуха.} \quad (28)$$

Объем воздуха, отнесенный к 1 кг абсолютно сухой его части, представлен здесь зависимостью от его температуры и влагосодержания.

Из (26) и (28) следует, что при нагревании плотность воздуха атмосферного давления уменьшается, а объем возрастает пропорционально T . При увеличении влагосодержания объем 1 кг воздуха возрастает, удваиваясь при $d=622$ и утраиваясь при $d=1244$ и т. д. по сравнению с объемом при $d=0$.

По приведенным уравнениям можно составить диаграммы количественных соотношений между параметрами воздуха.

10. td -ДИАГРАММА ВОЗДУХА

Параметры td - и Id -диаграмм

Определяющие параметры воздуха как сушильного агента — это его температура t и психрометрическая разность Δt (потенциал сушки [9]). Вспомогательные параметры: — энтальпия I , влагосодержание d , степень насыщенности пара φ и его давление p_p . Между этими переменными в процессе сушки параметрами существует многозначная взаимозависимость. Поэтому лучше изобразить ее графически, в виде диаграммы, облегчающей отсчет количественных значений параметров воздуха, анализ процессов сушки и технические их расчеты.

На рис. 4 показана td -диаграмма, содержащая указанные парамет-

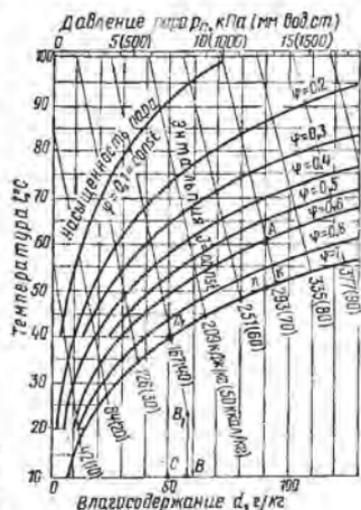


Рис. 4. td -Диаграмма воздуха с линиями: температур $t=\text{const}$ (горизонтали), влагосодержаний воздуха $d=\text{const}$ (вертикали), давлений пара $p_p=\text{const}$ (вертикали), энтальпий $I=\text{const}$ (наклонные) и степени насыщенности пара $\varphi=\text{const}$ (кривые)

ры воздуха. Она позволяет решать многие задачи термодинамики сушильного процесса, относящиеся к процессам сушки. Диаграмма построена в прямоугольной системе координат td . Диаграмма характеризует физическое состояние 1 кг абсолютно сухого воздуха в гомогенной смеси с $0,001d$ кг пара. Изотермы t диаграммы горизонтальны, линии влагосодержаний d и давлений пара p_p вертикальны, линии энтальпий I наклонны, а степени насыщенности пара φ изображены кривыми. Нижняя кривая $\varphi=1$ показывает насыщенное состояние пара в воздухе. В зоне диаграммы над этой линией воздух содержит перегретый пар ($\varphi < 1$). Ниже линии $\varphi=1$ зона тумана

на, т. е. пар в воздухе находится во влажном состоянии. Таким образом, линия $\varphi=1$ делит диаграмму на две зоны. В сушильной технике используется в основном верхняя зона. Шкала давлений пара p_n находится сверху диаграммы. Вместе с давлением воздуха p_v в любой точке диаграммы суммарное давление (p_n+p_v) равно барометрическому, т. е. 0,1 МПа (бар).

Для примера отсчитаем параметры воздуха в точке A : температура $t=61^\circ\text{C}$, влагосодержание $d=90$ г/кг, энтальпия $I=293$ кДж/кг (70 ккал/кг), степень насыщенности пара $\varphi=0,6$ и давление пара $p_n=12\,600$ Па (1260 мм вод. ст.). Если на td -диаграмме нанести точку B_1 , в зоне тумана, например, для влагосодержания $d=57$ г/кг и энтальпии $I=167$ кДж/кг (40 ккал/кг), то спроектированный вниз из точек B_1 и C_1 отрезок $BC=57-50=7$ г/кг покажет количество воды в воздухе, а отрезок $C0=50$ г/кг — количество пара. Общее влагосодержание покажет отрезок $B0=50+7$ г/кг. Точка C_1 линии B_1C_1 находится на кривой $\varphi=1$.

Из примера видно, что параметр d в верхней зоне диаграммы (над линией $\varphi=1$) правильнее называть *паросодержанием воздуха*, а в нижней зоне — *влагосодержанием*, с разделением в нижней зоне влагосодержания на паросодержание и водосодержание воздуха.

Из уравнения (23) следует, что при $d=0$ энтальпия, откладываемая по вертикали, линейно связана только с температурой. Поэтому на оси ординат совмещенно со шкалой температуры можно отсчитать энтальпию. Ее линии на этой диаграмме не параллельны между собой.

Такую td -диаграмму часто используют для расчетов отопления, вентиляции, сушки и т. д. Несмотря на простоту, полноту и наглядность, диаграмма с горизонтальными изотермами (поэтому — непараллельными линиями энтальпии) имеет существенный недостаток: она не позволяет анализировать процесс смешения воздуха различных состояний. Последнему требованию удовлетворяет Id -диаграмма проф. Л. К. Рамзина. На ней нанесены все указанные параметры, причем линии энтальпии параллельны между собой и нарастают линейно от t и d .

Построение Id -диаграммы Рамзина

Диаграмма построена в косоугольных координатах; на ось ординат нанесена энтальпия и одновременно температура воздуха, а на оси абсцисс — влагосодержание. Ось абсцисс — вспомогательная, значения d спроектированы на нее с линии $I=0$, проходящей через начало координат и расположенной внизу, под тупым углом к оси ординат.

Энтальпия I (кДж/кг или ккал/кг) воздуха суммируется графически (рис. 5) соответственно трем членам уравнения (23). При этом принимают, что изотерма $t=0^\circ\text{C}$ совпадает

Рис 5. Построение линий $l = \text{const}$ и $I = \text{const}$ на $I-d$ диаграмме

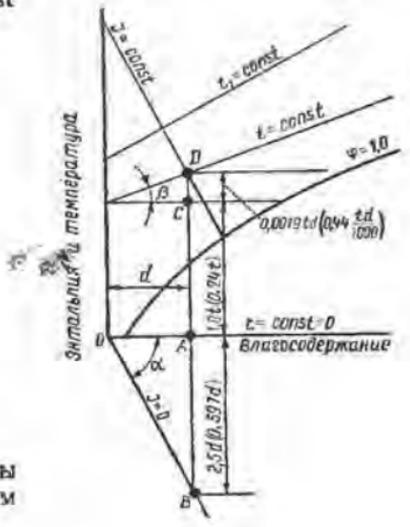
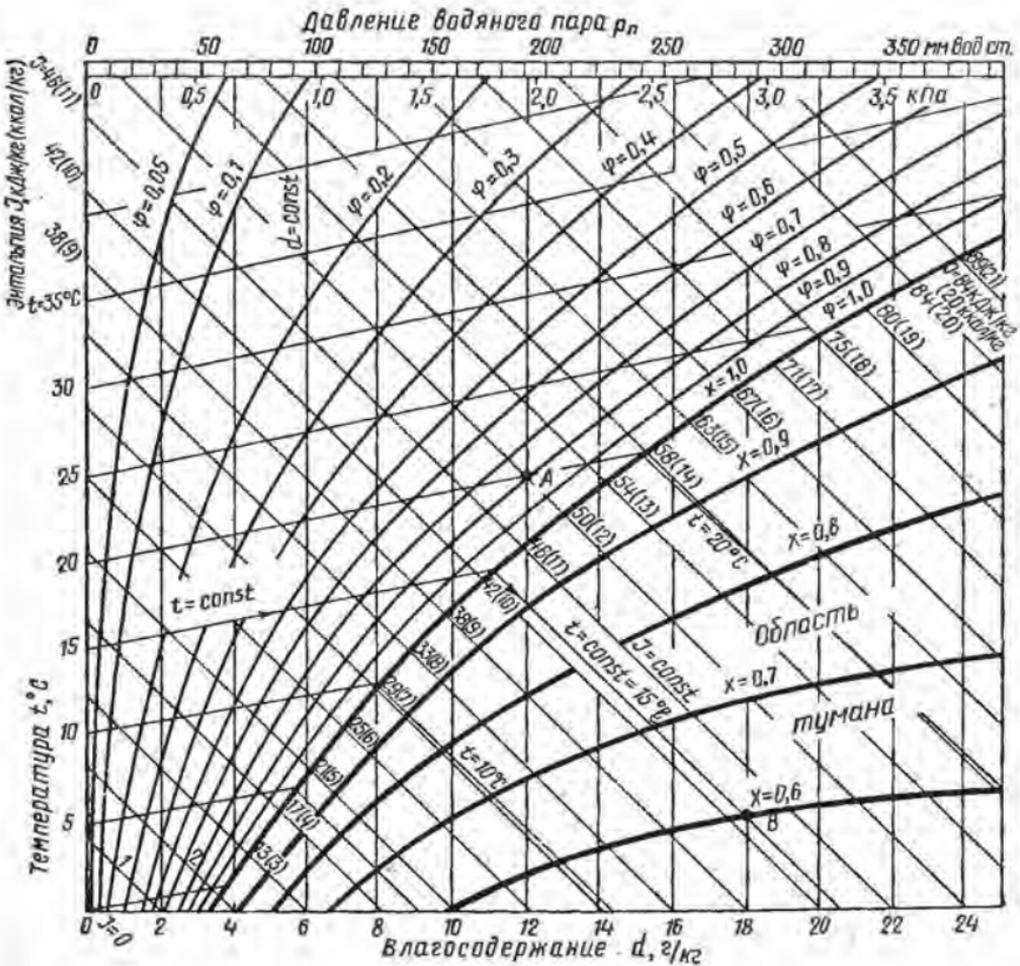


Рис. 6. Начальный участок $I-d$ диаграммы с линиями $l = \text{const}$, нанесенными под углом 45° к горизонтали



с осью абсцисс. Так как отрезок CD , представляющий графическую теплоту пара $0,0019 \text{ td}$ кДж/кг ($0,00044$ ккал/кг), пропорционален значению t , угол β , образуемый изотермой $t = \text{const}$ и горизонталью, с нарастанием t непрерывно увеличивается. Поэтому изотермы имеют вид расходящихся веером прямых вправо от оси ординат. На оси ординат, ниже $t=0$, значения энтальпий воздуха будут со знаком минус. Тангенс α — угла наклона линии $I=0$ и, следовательно, всех параллельных линий $I=\text{const}$ к горизонтали ($\text{tg}\alpha = AB/OA$) — при данном способе построения определится из масштабов, принятых для шкалы энтальпии M_I и влагосодержания M_d .

На рис. 6 показан основной участок Id -диаграммы ВТИ с величиной угла $\alpha=45^\circ$. Диаграмму можно дополнить областью тумана, шкалу p_n перенести вверх, как это выполнено на рис. 6, а угол α принять меньше 45° .

Такие исходные положения приняты в основу пересчитанной автором Id -диаграммы, которая при тех же масштабах и диапазонах t и d меньше по размеру и удобнее для пользования в лесосушильной технике, чем другие Id -диаграммы. Рабочая Id -диаграмма для расчета процесса сушки при температурах от -10 до $+125^\circ\text{C}$ и влагосодержаниях $0-500$ г/кг дана в приложении 1 (см. вкладку).

Длина шкалы давления пара на этой диаграмме составляет более 500 мм и расположена сверху, что значительно упрощает пользование ею; кроме того, отсчеты получаются более точными. Эта шкала построена по уравнению (18), из которого следует, что при $p=\text{const}$ давление пара есть функция лишь влагосодержания. По любым двум параметрам (кроме d и p_n , линии которых не пересекаются) легко найти все остальные.

Id -диаграмма может быть построена в прямоугольных координатах [10]; при этом линии $d=\text{const}$ остаются вертикальными, а линии $I=\text{const}$ будут горизонтальными, т. е. параллельными, что отвечает условию ее построения.

Пример. Отсчитываем для точки А: температура $t=20^\circ\text{C}$ (влево); влагосодержание $d=12$ г/кг (вниз); давление пара $p_n=1884$ Па (192 мм вод. ст.) (вверх); энтальпия $I=50,2$ кДж/кг (12 ккал/кг) (налево — вверх); степень насыщенности пара $\varphi=0,8$ (по кривой), температура точки росы $t_p=17^\circ\text{C}$ (вниз до кривой $\varphi=1,0$, затем влево). Для точки В в зоне тумана: температура $t=15^\circ\text{C}$ (налево вверх до кривой $\varphi=1$, затем влево); давление пара 1715 Па (175 мм вод. ст.) (налево вверх до кривой $\varphi=1$, затем вверх); влагосодержание 18 г/кг (вниз), в том числе паросодержание 11 г/кг (налево вверх до линии $\varphi=1$, затем вниз) и водосодержание $18-11=7$ г/кг.

Дополнения и варианты Id -диаграммы

Дополнение Id -диаграммы вспомогательными расчетными параметрами упрощает тепловые расчеты и анализ протекающих процессов. На Id -диаграмму можно нанести линии плотно-

сти воздуха $\rho = \text{const}$, для построения которых используют уравнение (26), а также линии объема воздуха на 1 кг абс. сух. его части $V_{1+0,001d} = \text{const}$ по уравнению (28). Величина ρ необходима для расчета аэродинамических сопротивлений установки, выявления условий работы вентиляторов и т. д. (рис. 7). Для точки В $\rho = 0,88 \text{ кг/м}^3$ и $V = 1,36 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t = 85^\circ \text{С}$, $\varphi = 0,4$ и т. д.

Id-Диаграмма, дополненная указанными линиями отражает все основные свойства воздуха как теплоносителя и влагопоглотителя и наглядно представляет взаимозависимость между его параметрами. Она является необходимым и универсальным пособием при расчетах и эксплуатации сушильных установок.

Расчеты с помощью *Id*-диаграммы достаточно точны для практических целей в пределах колебаний атмосферного давления 93 000—107 000 Па (700—800 мм рт. ст.); при больших отклонениях давления следует вводить поправки.

При уменьшении барометрического давления p линии $\varphi = \text{const}$ сдвинутся вправо и наоборот. Это следует из (3), по которому φ пропорциональна p_n , и из (18), показывающего, что при $d = \text{const}$ величина p_n изменяется пропорционально атмосферному давлению. Изменяются также параметры ρ и $V_{1+0,001d}$ [см. (26) и (28)].

В случае испарения в абсолютно сухой воздух не воды, а какой-либо другой жидкости должна быть построена иная *Id*-диаграмма. При этом линии $d = \text{const}$ (шкала абсцисс для этой жидкости) и исходные точки изотерм $t = \text{const}$ на ординате диаграммы (для воздуха) останутся без изменения [11].

Линия $x = 1,0$ (x — сухость пара в зоне тумана, см. рис. 6) и $\varphi = 1,0$ совмещаются на всем протяжении диаграммы. В диапазоне $d = 20 - \infty \text{ г/кг}$ эти кривые достаточно точно (ошибка менее 1%) описываются уравнением [кДж/кг (ккал/кг)]:

$$I = 15,9 \ln d + 2,68d - 26,8 = 36,6 \lg d + 2,68d - 26,8 \quad (29)$$

$$(I = 3,8 \ln d + 0,639d - 6,4 = 7,85 \lg d + 0,639d - 6,4).$$

Дифференцируя (29) по d , получим

$$\frac{dI}{d(d)} = \frac{15,9}{d} + 2,68 \left(\text{или } \frac{3,8}{d} + 0,639 \right). \quad (30)$$

Таким образом, имеем уравнение касательных к линиям $\varphi = 1,0$ и $x = 1,0$ (на *Id*-диаграмме в прямоугольных координатах). Изотерма $99,6^\circ \text{С}$ является асимптотой линий $\varphi = 1,0$ и $x = 1,0$. Линии $\varphi < 1$ не имеют асимптот, поскольку они обрываются вверху при $t = 374,15^\circ \text{С}$ или заканчиваются справа при $p_n = 0,1 \text{ МПа}$ (1 бар) и $t = 99,6^\circ \text{С}$. Они не имеют излома на изотерме $99,6^\circ \text{С}$ — зависимость $p_n(t)$ монотонная.

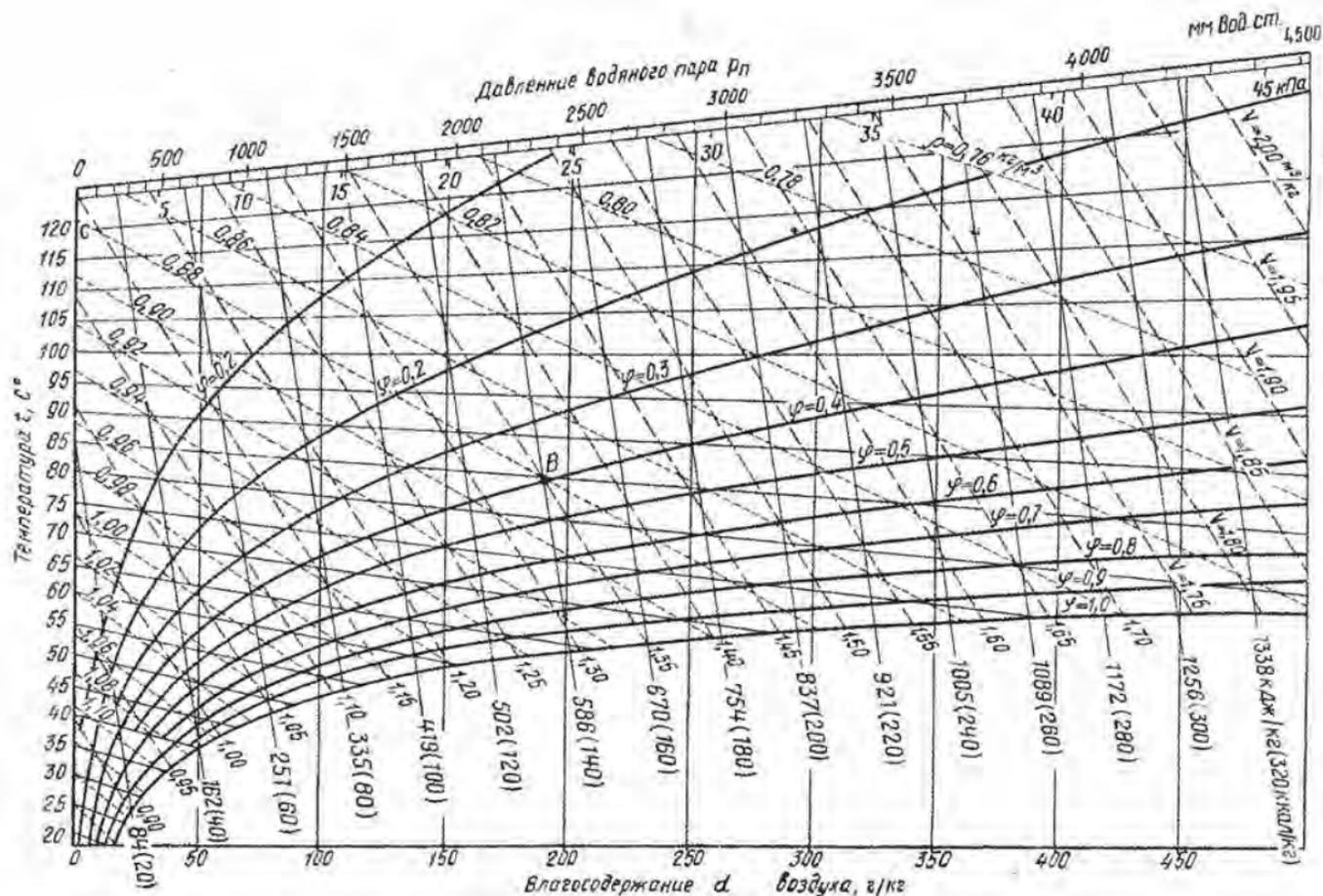


Рис. 7. I_d -диаграмма с вспомогательными линиями:

$\rho = \text{const}$ — плотности воздуха (частый пунктир), $V + 0,001d = \text{const}$ — объема воздуха в 1 м³ на 1 кг абсолютно сухой его части (редкий пунктир); линии $I = \text{const}$ сплошные, близкие к вертикали

tp-Диаграмма паровоздушной смеси

В сушильной технике наблюдается тенденция к повышению температур в сушильных установках, а также к кондиционированию древесины в конце сушки. Все больше применяют сушильный агент с высокими значениями φ ; при этом влагосодержание d выходит за пределы существующих *Id*-диаграмм. Поэтому возникла необходимость в разработке новой диаграммы, позволяющей графически рассчитывать и анализировать термодинамику сушильного процесса при 100°C и выше и при φ около 1, аналогично тому, как такой анализ проводится на обычных *Id*-диаграммах с нагретым воздухом при невысоком влагосодержании. Если на оси абсцисс *Id*-диаграммы вместо шкалы влагосодержания d нанести шкалу давлений пара p_n , исходя из их взаимозависимости по (16), а на оси ординат вместо энтальпии I нанести шкалу температур t , получим *tp*-диаграмму (рис. 8) паровоздушной смеси, называемую сокращенно *tp*-диаграмма. Шкала влагосодержаний находится вверху диаграммы.

Для построения *tp*-диаграммы принято давление среды 0,1 МПа (10 200 мм вод. ст.). Ось ординат показывает состояние абс. сух. воздуха, а крайняя справа ордината со значением $p_n=0,1$ МПа характеризует чистый пар с различной степенью насыщенности φ . Таким образом, на *tp*-диаграмме отсчитываются основные параметры (t, d, φ, I, p_n) любых соотношений паровоздушной смеси от $d=0$ (абс. сух. воздух) до $d=\infty$ (чистый пар — без воздуха) при $20\text{—}130^\circ\text{C}$.

Новая диаграмма построена, так же как и *Id*-диаграмма, на основе 1 кг абс. сух. воздуха, поэтому влагосодержание воздуха для $p_n=0,1$ МПа будет равно ∞ . В диаграмме наносят непараллельные прямые энтальпий $I=\text{const}$ и кривые линии $\varphi=\text{const}$. Таким образом, *tp*-диаграмма имеет основные черты, присущие *Id*-диаграмме. Если пользоваться верхней горизонтальной шкалой $d=\text{const}$, эта диаграмма выполнит роль *Id*-диаграммы. На ней нанесены линии $\rho=\text{const}$, $V_{1+0,001d}=\text{const}$.

На *tp*-диаграмме можно показать почти все термодинамические процессы, относящиеся к сушке материалов. Однако процесс смешения можно определить лишь тогда, когда оба состояния воздуха близки между собой по энтальпии. Применительно к высокотемпературной сушке добавка воздуха в сушильные камеры в тепловом расчете не предусматривается, а на практике ею обычно избегают пользоваться.

Смесь пара с воздухом может быть названа паровоздушной, если при $t_m > 80^\circ\text{C}$ давление пара ($p_n > 5\,000$ Па) в смеси превалирует над давлением абс. сух. воздуха ($p_a < 5\,000$ Па).

Влажность воздуха d , г/кг

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 240 280 300 350 400 450 500 600 700 800 900 1000 1200 1400 1600 2000 3000 4000 5000 $10^4 \cdot 210^{\circ}C$

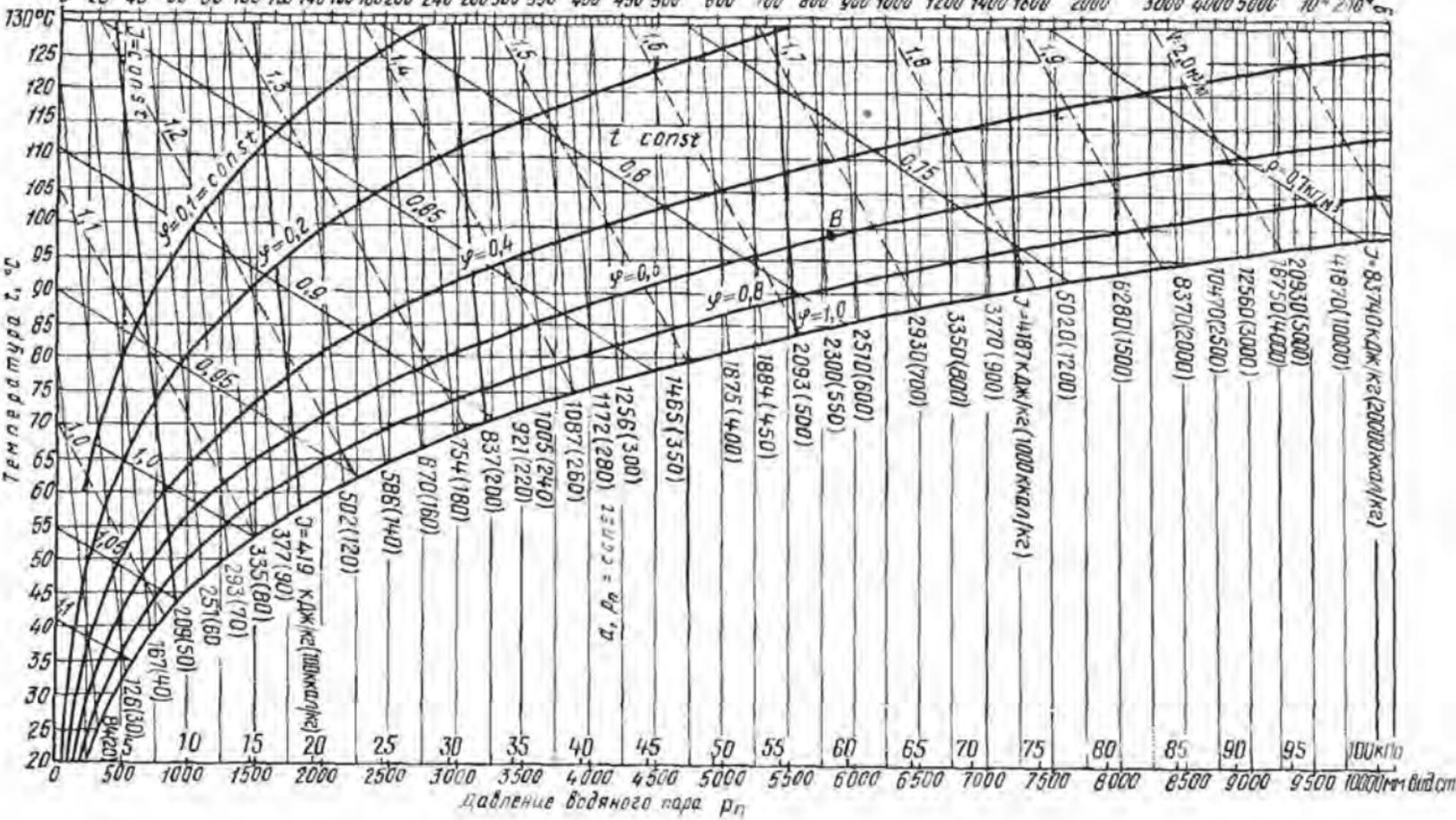


Рис. 8. t - p -Диаграмма паровоздушной смеси

II. НАНЕСЕНИЕ НА Id -ДИАГРАММУ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Процессы нагревания и охлаждения воздуха

В многообразных сушильных процессах нагревание и охлаждение неизменного количества (и давления) воздуха обычно происходят в результате теплообмена между воздухом, с одной стороны, и сухими нагревающими или охлаждающими поверхностями — с другой. Если в процессе теплообмена нет, влагосодержание воздуха при теплообмене *остается неизменным* ($d = \text{const}$). Следовательно, процесс нагревания (например,

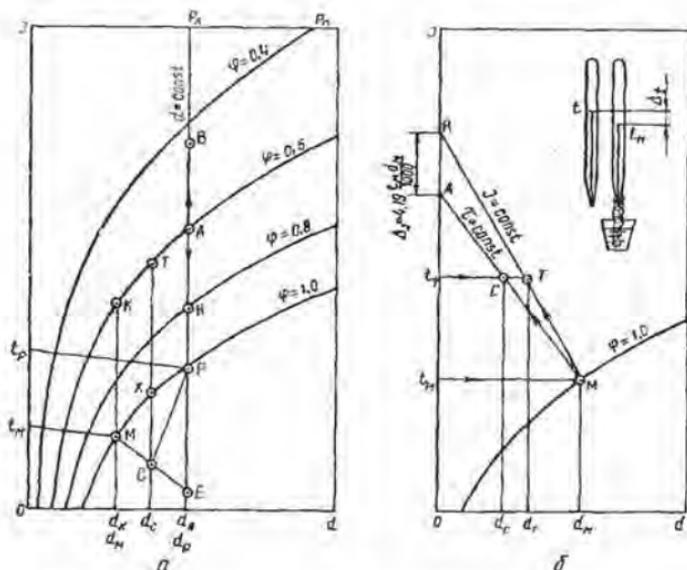


Рис. 9. Изображение на Id -диаграмме процессов:

a — нагревания-охлаждения воздуха и конденсации влаги; AB — нагревание воздуха; AP — его охлаждение; PM — конденсация влаги на холодной поверхности; MC — выделение капельной влаги при температуре t_M ; b — отсчет параметров воздуха по показанию психрометра

в калорифере) или охлаждения воздуха (у холодной сухой стены) на Id -диаграмме наносят по направлению линий постоянного влагосодержания ($d = \text{const}$), т. е. по вертикали. Это положение — одно из важнейших при рассмотрении сушильных процессов.

При нагревании воздуха точка A (рис. 9, a), характеризующая начальное его состояние, переместится на Id -диаграмме вверх в точку B , а при охлаждении — вниз в точку H . Несмотря на неизменное влагосодержание $d_A = \text{const}$ и постоянное давление пара $p_A = \text{const}$, степень насыщенности пара в воздухе φ при нагревании уменьшается, а при охлаждении увеличивает-

ся, поскольку в первом случае повышается, а во втором понижается влагоемкость. Если продолжать охлаждение воздуха, точка H может сместиться на линию $\varphi=1,0$ (точка P).

Температура, при которой охлаждающийся воздух (по $d=\text{const}$) достигает линии насыщения ($\varphi=1$), называется *точкой росы* t_p . Эта температура находится на изотерме, проходящей через точку P , где пересекаются линии $d=\text{const}$, $\varphi=1,0=\text{const}$. При дальнейшем охлаждении воздуха произойдет конденсация влаги. Образовавшиеся капельки воды могут или остаться в воздухе, создавая туман (точка E), или целиком выпасть из воздуха на находящуюся вблизи холодную поверхность, и тогда пар в воздухе останется сухим насыщенным, он будет, следовательно, прозрачным (точка M). Возможно, роса частично выпадет на поверхность и частично возникнет туман (точка C).

В сушильных установках обычно наблюдается последний случай конденсации влаги — с образованием росы и одновременно тумана. Количество выпавшей жидкости в первом случае будет соответствовать разности влагосодержаний в начале d_p и в конце d_m процесса конденсации влаги.

В случае частичного туманообразования количество выпавшей на холодную поверхность жидкой влаги равно разности влагосодержаний воздуха в точках A и C , между начальным d_A и промежуточным d_C его влагосодержанием, т. е. $d_A - d_C$.

Линия ME прямая. Она представляет собой часть изотермы t_m ME . Отрезок ME есть геометрическое место точек C конечного состояния тумана при одновременном протекании двух процессов выделения из воздуха влаги: его можно рассматривать в виде результата раздельного отражения этих процессов — выпадения на поверхности жидкой влаги PX и туманообразования XC .

Если с поверхности отвести воду в количестве $d_p - d_m$ и нагреть воздух, чтобы его пар достиг начальной насыщенности φ_A , состояние воздуха определится точкой K . В этой точке воздух будет характеризоваться как меньшим влагосодержанием ($d_A > d_K$), так и пониженной энтальпией (в результате выделения и отвода тепла при конденсации пара) по сравнению с начальным состоянием воздуха в точке A .

Если нагревать туман, характеризующийся точкой E , до достижения им состояния в точке P , а затем подогреть воздух до той же кривой φ_A , получим начальное состояние воздуха в точке A . Следовательно, этот процесс обратим.

В случае нагревания воздуха, обозначенного точкой C , до начального состояния φ , его параметры зафиксируются точкой T , показывающей частичное снижение (на величину $d_A - d_C$) влагосодержания воздуха.

Таким образом, уменьшить содержание пара в охлаждаемом воздухе можно разными способами: а) выделением из него

росы на холодную поверхность; б) туманообразованием; в) сочетанием обоих этих способов. Отсюда выявляются направления соответствующих инженерных разработок и их эффективность по снижению содержания пара в воздухе, а также по его обестуманиванию.

Изображение на I_d -диаграмме процесса испарения влаги

Рассмотрим основную закономерность сушильного процесса. При конвективной сушке испарение из материала влаги, имеющей температуру 0°C , происходит за счет теплообмена: воздух отдает часть заключающейся в нем теплоты материалу и, следовательно, охлаждается, но одновременно получает это же количество теплоты (закон сохранения энергии) с выделяющимся из материала паром, являющимся теплоносителем даже в ненагретом состоянии [см. (22)]. При таком теплообменном процессе воздух, охлаждаясь, увеличивает влагосодержание, давление пара, степень насыщенности и точку росы по сравнению с начальным состоянием.

На I_d -диаграмме процесс испарения влаги показан изменением состояния воздуха по линии постоянной энтальпии $I = \text{const}$ (рис. 9, б) в направлении вниз направо (TM), т. е. с увеличением влагосодержания воздуха. При поглощении (сорбции) влаги из воздуха материалом процесс также будет нанесен на $I = \text{const}$, но в противоположном направлении (MT).

Иллюстрацией физической сущности процесса испарения влаги может служить широко применяемый в сушильной, отопительной, вентиляционной и других областях техники прибор — психрометр. Этот прибор состоит из двух термометров; шарик одного из них, покрытый двумя-тремя слоями марли, смачивается водой, поэтому термометр называется мокрым (см. рис. 9, б, сверху).

При испарении влаги с шарика мокрого термометра температура его по сравнению с температурой сухого термометра понижается из-за поглощения образующимся паром скрытой теплоты испарения. Разность температур $t - t_m = \Delta_t$ сухого и мокрого термометров (психрометрическая разность) зависит от интенсивности испарения влаги. Если она равна нулю (т. е. теплообмена нет), влага не испаряется, что указывает на насыщенное состояние пара в воздухе ($\varphi = 1,0$). Чем суше воздух и выше его скорость, тем больше психрометрическая разность.

На основании показаний психрометра легко установить на I_d -диаграмме искомые параметры воздуха, не пользуясь психрометрическими таблицами. Температура мокрого термометра находится на изотерме t_m и одновременно на линии насыщения ($\varphi = 1,0$), поскольку пар в тонком слое воздуха вокруг марли находится в насыщенном состоянии (точка M). Влагосодержание воздуха для точки M составляет d_m .

Пар, образующийся в количестве d_M на 1 кг воздуха из нагретой воды с температурой t_m и теплоемкостью 4,19 кДж/(кг·°С) [1 ккал/(кг·°С)], будет иметь энтальпию, увеличенную по сравнению с энтальпией пара при испарении воды с температурой 0°С на

$$\Delta_I = 4,19t_m d_M / 1000 \text{ (кДж/кг)} \quad (31)$$

$$[\Delta_I = t_m d_M / 1000 \text{ (ккал/кг)}].$$

Линию процесса испарения воды с шарика мокрого термометра при температуре воды t_m определяют следующим образом. Из точки M проводят линию $I = \text{const}$ до пересечения ее с осью ординат в точке B . От этой точки откладывают вниз отрезок BA , равный значению $\Delta_I = 4,19 t_m d_M / 1000$ кДж/кг, и соединяют точки A и M прямой.

Линия AM , называемая линией *адиабатного насыщения* или линией постоянного *предела охлаждения* ($\tau = \text{const}$), представляет собой геометрическое место точек состояний воздуха, испаряющего воду с температурой t_m мокрого термометра. Если затем провести изотерму t по показанию сухого термометра, точка C ее пересечения с линией AM определит на Id -диаграмме все параметры замеренного психрометром воздуха C . Линия CM , направленная книзу направо, показывает процесс испарения воды с шарика мокрого термометра. При этом энтальпия воздуха несколько увеличивается за счет физической теплоты, содержащейся в испарившейся воде, имевшей температуру выше нуля.

Отложенная на оси ординат поправка BA соответствует теплоте испарения воды при t_m в абсолютно сухой воздух ($d = 0$). При испарении воды в воздухе с влажностью $d_C > 0$ эта поправка будет меньше, а именно:

$$\Delta_I = 4,19t_m (d_M - d_C) / 1000 \text{ (кДж/кг)} \quad (32)$$

$$[\Delta_I = t_m (d_M - d_C) / 1000 \text{ (ккал/кг)}].$$

Важно найти с помощью Id -диаграммы точку состояния воздуха по показаниям психрометра. Ее определяют следующим образом. Находят изотерму t_m мокрого термометра и точку M ее пересечения с линией $\phi = 1,0$. Затем поднимаются по линии предела охлаждения $\tau = \text{const}$ до пересечения с изотермой t_1 сухого термометра (точка C), как это показано стрелками на рис. 9, б. По выявленному состоянию воздуха в точке C могут быть установлены его параметры t , ϕ , d , ρ , I , t_p , а также ρ и $V_{1+0,001d}$.

В технических расчетах и в производственных условиях точку *состояния воздуха по показаниям психрометра* обычно определяют как точку T — по линиям $I = \text{const}$, имеющимся на всех

Id-диаграммах, вместо более точного установления ее в точке *C* по линии $\tau = \text{const}$.

Потенциал сушки означает величину температурного напора между воздухом и испаряемой водой, следовательно, количество переданной теплоты и пропорциональную ей интенсивность испарения влаги. Если на *Id*-диаграмме соединим точки с одинаковой психрометрической разностью, получим линию постоянного потенциала сушки [9]. При испарении гигроскопической влаги точка *M* отрывается от линии $\phi = 1,0$ и приближается по линии *MC* к точке *C*, поэтому скорость сушки уменьшается.

Для зависимости между психрометрической разностью Δ_t (Па) и разностью давлений пара $p_n - p_n$ на поверхности испаряющейся по $I = \text{const}$ свободной влаги из древесины p_n и в воздухе p_n предлагается соотношение, применимое при $p_n < 60$ кПа (0,6 бар):

$$\Delta_t = (p_n - p_n) / (65 - 0,0006 p_n) \quad [\text{или} \quad \Delta_p = \Delta_t (65 - 0,0006 p_n)]. \quad (33)$$

Например, при давлении содержащегося в воздухе сушильной камеры пара $p_n = 25\,000$ Па (2500 мм вод. ст.), когда $t_m = 65^\circ \text{C}$, определим

$$\Delta_p = (65 - 0,0006 \cdot 25\,000) \Delta_t = 50 \Delta_t \text{ Па} \quad [\text{или} \quad \Delta_p = 5 \Delta_t \text{ кгс/м}^2], \quad (34)$$

т.е. Δ_p составляет в паскалях пятидесятикратную (а в миллиметрах водяного столба — пятикратную) психрометрическую разность Δ_t . Величина Δ_t наряду с температурой t — основной параметр процесса конвективной сушки пиломатериалов. Так связан потенциал сушки Δ_t с потенциалом испарения воды Δ_p .

При высокотемпературной сушке пиломатериалов необходимо установить параметры сушильного агента атмосферного давления, когда показания температур по мокрому термометру близки к 100°C . Для этой цели можно использовать следующие значения парциальных давлений насыщенного пара p_n в воздухе и влагосодержания воздуха как функцию температуры точки росы, а вблизи кривой $\phi = 1,0$ — достаточно близко и по показаниям мокрого термометра t_m :

$t, ^\circ\text{C}$ (или t_m)	99	98	97	96	95
$p_n, \text{Па}$	97 800	94 300	90 900	87 700	84 500
$d, \text{г/кг}$	27 600	10 300	6 210	4 430	3 390
$t, ^\circ\text{C}$ (или t_m)	93	90	85	80	75
$p_n, \text{Па}$	78 500	70 100	57 800	47 400	38 500
$d, \text{г/кг}$	2 270	1 450	852	560	390

Зависимость между давлением p_n (Па) пара (следовательно, воздуха $p_v = p - p_n$) и температурой по мокрому термометру психрометра в указанном диапазоне с достаточной для технических расчетов точностью выражается уравнением

$$p_n = 1 - p_v = 10^5 \left(\frac{t_m}{99,6} \right)^{3,4}, \quad (35)$$

$$\text{т. е. } p_n = 0,0160 t_m^{3,4}. \quad (36)$$

Для ненасыщенного пара в воздухе, когда $\Delta t > 0$, из последнего соотношения с учетом (33) получим, Па:

$$p_n = \frac{0,0160 t_m^{3,4} - 65 \Delta t}{1 - 0,0006 \Delta t}. \quad (37)$$

Например, при $t_m = 90^\circ \text{C}$ и $\Delta t = 20^\circ \text{C}$ (т. е. $t = 110^\circ \text{C}$)

$$p_n = \frac{0,0160 \cdot 90^{3,4} - 65 \cdot 20}{1 - 0,0006 \cdot 20} = \frac{0,0160 \cdot 4,4 \cdot 10^6 - 1300}{0,988} = 71\,700 \text{ Па}$$
 (7310 мм вод. ст.).

Как видно из примера, в условиях сушки пиломатериалов при небольших значениях Δt величины p_n и p_n при $t_m = \text{const}$ отличаются менее чем на 1%, поэтому из (37) будет

$$p_n \approx 0,0160 t_m^{3,4} \text{ Па}, \quad (38)$$

если не исследуется сама величина Δp [см. (33)].

Изображение на Id -диаграмме смещений воздуха

Уравнение энтальпии (23) показывает линейные зависимости $I(t, d)$, поэтому смешение воздуха двух состояний B и A изобразится на Id -диаграмме прямой линией; точка C , характеризующая смесь (рис. 10), будет находиться на линии AB ; расстояние точки C от точек B и A обратно пропорционально количествам воздуха в этих точках до его смешения. Получим отношение n отрезков AC и CB :

$$n = (d_C - d_A)/(d_B - d_C) = CA/BC. \quad (39)$$

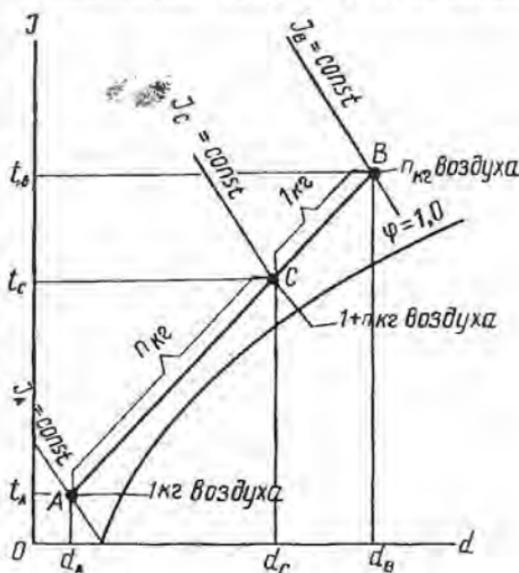
Количество воздуха B , определяемое величиной отрезка AC , принимаем равным n кг, а количество воздуха A , устанавливаемое величиной отрезка CB , — 1 кг.

Таким образом, правило смешения двух состояний воздуха изображается на Id -диаграмме аналогично правилу рычага: произведение первого количества воздуха A на первое плечо CA равно произведению второго количества воздуха B на прилегающее к нему второе плечо BC ; точка смеси C моделирует на рис. 10 опору рычага. При смешении воздуха нескольких состояний параметры конечной смеси находят путем последова-

тельного графического построения процессов смешения воздуха двух состояний с учетом возрастающих его количеств.

В технических расчетах на смешение воздуха разность влажностей при $0-150^{\circ}\text{C}$ может быть заменена соответствующей разностью температур [аналогично (38) и (16)]. Тогда пропорцию смеси определяют по показанию термометров (точки A , C и B). В приближенных расчетах принимают, что при смешении холодного и горячего воздуха (или добавки продуктов сгорания) объем смеси равен сумме их объемов до смешения. В более точных расчетах учитывают теплоемкости компонентов смеси.

Рис. 10. Изображение на Id -диаграмме параметров смешения воздуха двух состояний (B и A)



12. НАНЕСЕНИЕ НА Id -ДИАГРАММУ ЦИКЛИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ СУШКИ

Теоретический процесс сушки

В производственных сушильных установках воздух как сушильный агент претерпевает ряд последовательных тепловлажностных изменений своего состояния, образующих цикл.

На рис. 11, a показана принципиальная схема, а на рис. 11, $б$ техническая схема простейшей сушильной установки, состоящей из ограждений 5 (заштрихованы) приточного канала 0, вытяжной трубы и калорифера (нагревателя) 4. Поступая к калориферу 4, свежий воздух с состоянием t_0 и d_0 (см. обе схемы) нагревается до состояния t_1 и d_1 и затем направляется к высушиваемому материалу 6 для испарения влаги. Прошедший через материал увлажнившийся и охладившийся воздух в отработанном состоянии удаляется через вытяжную трубу наружу. В сушильных установках, работающих по такой системе, происходит *однократная циркуляция* воздуха по материалу.

Теоретический процесс сушки с однократной циркуляцией воздуха по материалу изображен на Id -диаграмме (рис. 11, $в$). Теоретическим называется процесс сушки, при котором нет потерь тепла воздухом, например через ограждения, и добавки

тепла (или их сумма равна нулю). Для теоретического процесса сушки энтальпия воздуха до I_1 и после испарения влаги I_2 принимается неизменной, т. е. $I_1 = I_2$.

Рассмотрим этот процесс на $I-d$ -диаграмме. Обозначим (см. рис. 11, в) состояние воздуха, вступающего в калорифер, точкой 0, после калорифера — точкой 1 и после материала — точкой 2. Протяженность вертикального отрезка 0—1 с учетом масштаба показывает величину подогрева воздуха (кДж/кг) в калорифере.

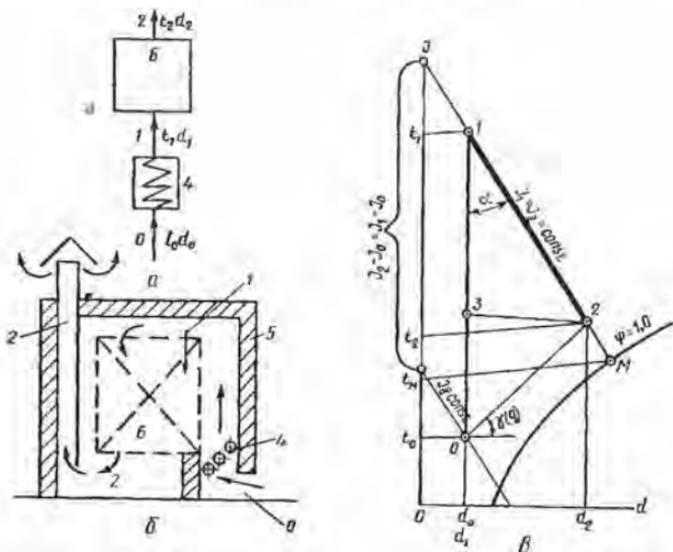


Рис. 11. Процесс сушки с однократной циркуляцией воздуха по материалу: 1 — нагретый воздух; 2 — обработанный воздух; 3 — полунатгретый воздух; 4 — калорифер; 5 — ограждение камеры; 6 — высушиваемый материал

Отрезок 1—2 обозначает испарение влаги из материала с приращением влагосодержания воздуха от d_0 до d_2 . Так как влагосодержание d выражено в граммах, количество влаги в килограммах, уносимое из материала 1 кг воздуха, будет равно $(d_2 - d_0)/1000$, а расход воздуха l_0 (кг) на испарение 1 кг влаги составит

$$l_0 = 1000 / (d_2 - d_0). \quad (40)$$

Для нагревания 1 кг воздуха нужно затратить $I_1 - I_0 = I_2 - I_0$ кДж тепла, а на нагревание l_0 кг воздуха, испаряющего 1 кг свободной влаги с нулевой температурой, потребуется тепла

$$q = l_0 (I_1 - I_0) = 1000 (I_2 - I_0) / (d_2 - d_0). \quad (41)$$

Величина q определяется также величиной угла γ , образованного горизонтальной линией, проходящей через точки 0 и 2 —

начального и конечного состояния воздуха в процессе сушки. Действительно, из уравнения (40) и треугольника $0-1-2$ (см. рис. 11, в) следует, что расход тепла q равен отношению отрезков $3-0$ к $2-3$, представляющим собой $\operatorname{tg} \gamma$. Треугольник $3-1-2$ подобен для всех теоретических процессов сушки (линия $2-3$ горизонтальна), и его углы определяются наклоном линии $I = \text{const}$ в данной Id -диаграмме.

На полях некоторых Id -диаграмм нанесены концы линий $q = \text{const}$. Все линии $q = \text{const}$ проходят через начало координат. Для нахождения q графическим способом следует провести параллельный для линии $0-2$ луч, проходящий через начало координат, и на другом конце луча, т.е. на полях диаграммы (справа или вверх) отсчитать значение q .

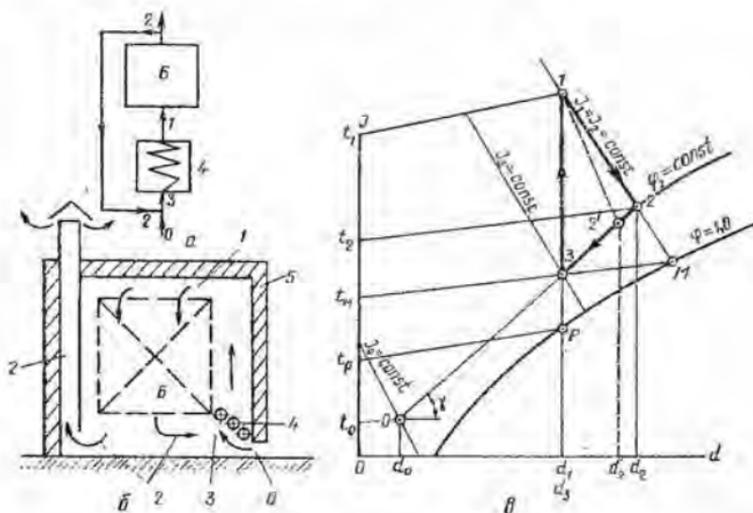


Рис. 12. Процесс сушки с многократной циркуляцией воздуха по материалу:

a — принципиальная схема процесса; b — схема сушильной камеры; $в$ — построение процесса на Id -диаграмме; 1 — нагретый воздух перед вступлением к материалу; 2 — отработанный воздух после выхода из материала; 3 — смешение отработанного воздуха со свежим ($1-2-3$ — треугольник сушки); 4 — калорифер; 5 — ограждение камеры; 6 — материал

Теоретический процесс сушки с многократной циркуляцией воздуха изображен на рис. 12. Отработанный воздух 2 лишь частично удаляется наружу. Большая его часть возвращается, к ней примешивается свежий воздух; смесь поступает повторно в калорифер 4 и затем к материалу 6 для испарения влаги. Такую установку иногда называют установкой с повторным насыщением воздуха (рис. 12, $a, б$), или рециркуляционной.

Процесс смешения отработанного воздуха 2 со свежим 0 изобразится отрезком $0-2$ (рис. 12, $в$). Смесь, определяемая точкой 3 , поступает в калорифер, нагревается (отрезок $3-1$) и испаряет влагу из материала (отрезок $1-2$). После этого

отработанный воздух (точка 2) смешивается со свежим (точка 0), и процесс повторяется.

Треугольник 1—2—3 называется *треугольником сушки*. Характерными для построения этого треугольника будут точка М — показание мокрого термометра, Р — точка росы и 0 — состояние свежего воздуха.

Количество циркулирующего по материалу воздуха l , проходящегося на 1 кг испаряемой влаги, составит (кг/кг):

$$l = 1000 / (d_2 - d_1). \quad (42)$$

Расход тепла q (кДж/кг) находят по (41).

Уравнения (40), (41) и (42) основные в тепловых расчетах сушильного процесса. На них базируются также расчеты теплового и вентиляторного оборудования сушильных установок. Количество свежего воздуха и равное ему количество удаляемого наружу отработанного также на 1 кг испаряемой влаги определяются по (40).

Кратностью циркуляции воздуха называется отношение (см. рис. 12, в)

$$\frac{d_2 - d_0}{d_2 - d_1} = K = \frac{l}{l_0} \text{ или в отрезках } \frac{2 \div 0}{2 \div 3} = K. \quad (43)$$

При $K=1$, когда $d_2 - d_0 = d_2 - d_1$ и точка 3 совпадает с точкой 0, процесс будет с однократной циркуляцией, а при $K > 1$, когда $(d_2 - d_0) > (d_2 - d_1)$ — с многократной циркуляцией. Кратность циркуляции равна отношению количества воздуха, циркулирующего по материалу, l к количеству добавляемого свежего воздуха l_0 .

Величину $K-1=n$ называют коэффициентом добавки воздуха. При $K-1=0$ циркуляция однократная, добавки отработанного воздуха нет.

Действительный процесс сушки на Id -диаграмме

Действительный процесс отличается от теоретического дополнительным расходом тепла на подогрев материала, в окружающую среду через ограждения, с неорганизованным воздухообменом и др. Если при теоретическом процессе $I_1 = I_2 = 0$, то для действительного процесса в установившемся состоянии необходимо учесть теплопотери, добавив теплоту: на нагрев материала, неорганизованный воздухообмен, потери через ограждения и др. (Σq), но вычесть теплоту 1 кг испаряемой нагретой влаги ϑ ; тогда, отнеся теплопотери к 1 кг воздуха, найдем

$$I_1 - I_2 - \frac{\Sigma q - \vartheta}{l} = (\Sigma q - \vartheta) \frac{d_1 - d_2}{1000}. \quad (44)$$

Если из точки 2 окончания теоретического процесса сушки 1—2 (рис. 12, в) отложить по $\varphi_2 = \text{const}$ величину 2—2' равную $I_1 - I_2$ (44) и соединить точки 1 и 2', получим линию 1—2' (пунктир) действительного процесса сушки. Так как l определяется при этом уменьшенной разностью влагосодержаний $d_2' - d_1$ по сравнению с теоретической $d_2 - d_1$, расход воздуха [и тепла по (41)] на 1 кг влаги, испаряемой из материала, соответственно возрастает. Расход тепла составит:

$$q' = 1000 (I_2 - I_0) / (d_2' - d_0), \quad (45)$$

Эта корректировка расчета, учитывающая теплопотери, относится и к однократной циркуляции воздуха [см. (40)].

Смешение пара с воздухом

При сушке пиломатериалов твердых пород или толстых сортиментов любых пород воздух часто увлажняют добавлением к нему пара (пропаркой). Процесс смешения пара с воздухом имеет важное технологическое значение. Для увлажнения воздуха в рабочее пространство сушильной камеры пускают пар обычно такой же характеристики, как и пар, поступающий в калориферы. При этом давление пара, выходящего из отверстий увлажнительной трубы, равно 0,1 МПа.

В обычных производственных условиях сушки пиломатериалов температура впускаемого к материалу пара выше температуры воздуха. При смешении насыщенного или перегретого пара с нагретым воздухом температуру смеси $t_{\text{см}}$ определяют по правилу смешения:

$$t_{\text{см}} = \frac{c_{\text{п}} t_{\text{п}} n + c_{\text{в}} t_{\text{в}}}{c_{\text{п}} n + c_{\text{в}}}, \quad (46)$$

где $c_{\text{п}}$ и $c_{\text{в}}$ — соответственно массовая теплоемкость пара и воздуха; n — количество пара на 1 кг воздуха (обычно $n < 1$), кг; $t_{\text{п}}$ и $t_{\text{в}}$ — соответственно температура пара и воздуха.

Процесс смешения пара, поступающего в камеру из паропровода, с воздухом, отобразится на Id -диаграмме следующим образом. Наносят точку A состояния воздуха (рис. 13, а), а также изотерму CE пара — по его температуре при вступлении в сушильную камеру. Затем из точки A проводят вправо линию AM , параллельную изотерме пара. На этой линии будет находиться точки смеси B , поскольку влагосодержание d пара равно ∞ , где пересекается с изотермой пара CE параллельная ей линия AM .

При количестве примешанного пара, равном n (кг/кг) или $1000 n$ (г/кг), откладывая соответствующий отрезок на оси абсцисс вправо от точки d_A , получим влагосодержание смеси d_B . Линия $d_B = \text{const}$ на пересечении с линией AM определит точ-

ку B смеси. Компоненты смеси — воздух в точке B и пар, определяемый на линии AM или на линии CE , когда $d = \infty$.

В случае добавки пара к холодному воздуху P , например в начале прогрева загруженного в камеру холодного материала, процесс смешения отобразится линией PT , также параллельной изотерме пара CE . Как видно из рис. 13, a , смесь T может оказаться в зоне тумана. По мере нагревания смеси точка P переместится в точку P' , а затем в точку A . Линии CE , $P'T'$ и PT параллельны.

Обычно температура примешиваемого пара $t_{\text{п}}$ больше температуры сушильного агента t_A , при этом $t_B > t_A$ и одновремен-

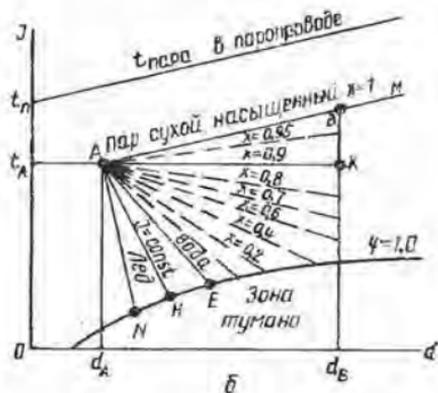
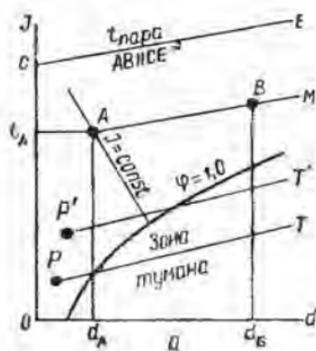


Рис. 13. Изображение на Id -диаграмме процессов смешения воздуха:
 a — с сухим насыщенным или перегретым паром; b — с влажным паром

но $t_B > t_A$. Если температура пара меньше температуры воздуха, что может быть когда $t_A > 100^\circ \text{C}$, в результате добавки сухого насыщенного пара с температурой $t_{\text{п}} = 100^\circ \text{C}$ температура воздуха до поступления к материалу будет снижаться. Такой процесс охлаждения при добавке пара не обычен, но реален. Воздух охлаждается еще больше, если примешиваемый пар влажный. В этом случае температура воздуха может снижаться даже тогда, когда $t_{\text{п}} > t_A$. Предпочтительным для увлажнения воздуха в сушильных камерах будет сухой насыщенный пар низкого давления.

Процесс добавки к воздуху A пара влажного с температурой $t_{\text{п}}$ показан на рис. 13, b . Для нахождения состояния смеси проводят линию AM , параллельную изотерме пара, и от точки A состояния воздуха вправо откладывают луч AK , на котором находят параметры смеси. Направление этого луча определится из заданной величины сухости пара X (на рис. 13, b для луча AK величина $X = 0,9$). Весь диапазон возможных сухостей пара от $X = 1,0$ (сухой насыщенный пар давлением 10^5 Па до $X = 0,0$ (вода с температурой 0°C) определяется углом HAM ,

эквивалентным содержанию тепла пара 2675 кДж/кг (639 ккал/кг). При этом луч AH , соответствующий нулевой температуре воды, испаряемой воздухом A (например, распыляемой в него), направлен по линии $I = \text{const}$. Луч AE соответствует температуре испаряемой воды $\approx 100^\circ\text{C}$ с энтальпией 419 кДж/кг (100 ккал/кг). Остальные лучи находятся внутри угла EAM , соответственно энтальпии добавляемого в воздух A влажного пара. Их направление определяется методом, показанным на рис. 9, б. Подробнее эта задача была рассмотрена ранее [12].

Применение влажного пара эквивалентно использованию пара сухого насыщенного и одновременному распыливанию воды той же температуры. Поэтому очень влажный пар мало пригоден для начальной, возможно, и промежуточной, влаготеплообработки высушиваемых пиломатериалов. Тем более не достигает цели часто предлагаемое для пропарки материала распыливание воды в сушильный агент.

Процесс испарения распыляемой воды (или испаряемой из противней с водой, с развешанных мокрых полотен и т. д.) при ее температуре равной t_M показан на рис. 13, б отрезком AE , по линии предела охлаждения, т. е. линии мокрого термометра (линия CM на рис. 9, б). Воздух будет сильно охлаждаться с небольшим возрастанием d .

Из рассмотренного следует, что испарение воды, распыливаемой из форсунок, со смачиваемых поверхностей и т. д. эквивалентно термодинамическому эффекту от испарения воды с влажных поверхностей материала. Следовательно, в целях достижения повышенной насыщенности и влагосодержания сушильного агента лучше принять меры, чтобы удерживать и сохранить в сушильной камере влагу, выделяющуюся из высушиваемого материала.

Однако применение влажного пара и даже впрыскивание горячей воды в сушильный агент может оказаться полезным в конце процесса сушки материала для конечной его влаготеплообработки (см. ниже). Отрезок AH на рис. 13, б показывает испарение воды с температурой равной нулю, а отрезок AN испарение распыленного льда (снега), а также влаги с обледеневшей древесины [13].

Влияние различных тепловлажностных воздействий

Основные параметры *теоретического* процесса сушки показаны на рис. 12. При изменении параметров треугольник процесса сушки смещается на Id -диаграмме. Такое смещение будет при недостаточном управлении сушильной установкой, отсутствии авторегулирования, временном резком нарушении процесса или недостатке в потребных резервах тепла и влаги и др.

На состояние параметров *практического* сушильного процесса влияют теплопотери (44), добавка воздуха с неорганизованным воздухообменом, добавка пара различного состояния в сушильный агент, конденсация влаги на поверхности материала и ограждений камеры, сорбирование влаги материалом и др. Очень важно проследить воздействие этих составляющих практического процесса сушки на возможное смещение состояния сушильного агента на *Id*-диаграмме по сравнению с положением на ней треугольника теоретического процесса сушки.

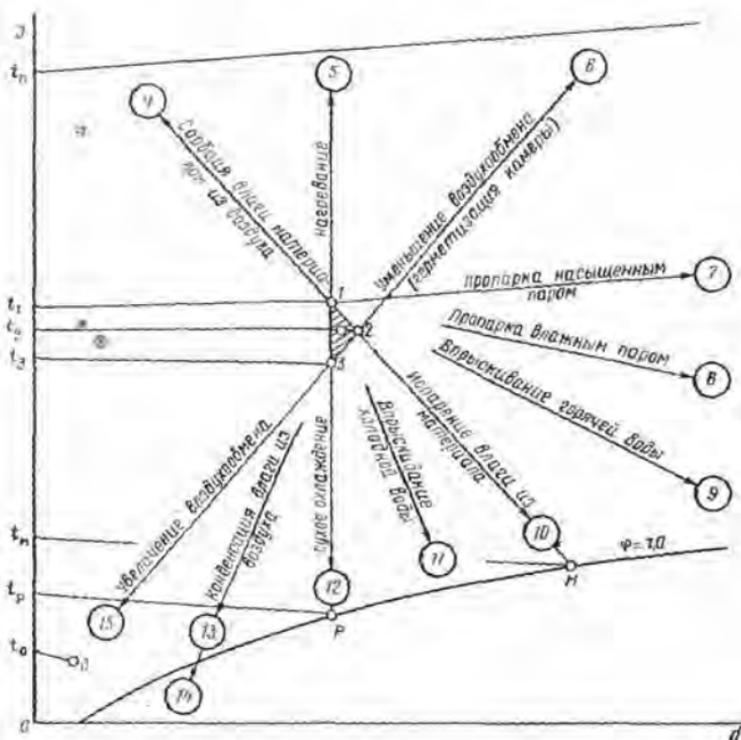


Рис. 14. Смещение на *Id*-диаграмме «треугольника сушки» при различных тепловлажностных воздействиях

При увеличении нагрева воздуха в калорифере треугольник сушки поднимется вверх по линии $d = \text{const}$ (стрелка 5 на рис. 14), т. е. величины φ снизятся, а при дополнительном охлаждении воздуха ограждениями, например зимой, он опустится вниз (стрелка 12), приближаясь к точке росы P ; при большем испарении влаги из материала (например, тонкого) треугольник сушки сместится по стрелке 10 к точке M предела охлаждения t_m и, наоборот, при сорбировании части парообразной влаги сухой поверхностью материала — в противоположном направлении, как это показано стрелкой 4. Усиленная добавка свежего воздуха организованным (через регулируемые заслон-

ки) или неорганизованным (через неплотности в камере) путем приведет к смещению треугольника в сторону начала координат *I*_d-диаграммы, т. е. к уменьшению влагосодержания воздуха (стрелка 15); наоборот, уменьшение организованного и неорганизованного воздухообмена, например при герметизации камеры, будет способствовать увеличению влагосодержания, энтальпии и температуры мокрого термометра (стрелка 6). Процессы 12 и 5 взаимно противоположны по направлению также, как процессы 10 и 4, 15 и 6.

На смещение треугольника сушки воздействует также конденсация влаги на холодном материале 13, туманообразование в камере 14, добавка сухого насыщенного пара в воздух 7, добавка влажного пара 8, впрыскивание горячей воды 9 и впрыскивание холодной воды 11.

Из рис. 14 следует, что для повышения температуры воздуха надо уменьшить воздухообмен 6, сократить теплопотери 12, усилить нагрев воздуха в калорифере 5 и учесть выделение тепла при сорбировании влаги материалом 4. Увеличение влагосодержания и энтальпии воздуха достигается уменьшением воздухообмена 6 и добавкой пара к сушильному агенту 7. Температура сушильного агента понижается вследствие испарения воды из материала 10, добавки в рабочее пространство сушильного туннеля холодного материала 12 и впрыскивания в камеру воды 9 и 11, а также при увеличении теплопотерь 12. Снижение температуры и влагосодержания сушильного агента — результат конденсации влаги на холодных ограждениях камеры 13 и увеличения воздухообмена 15. Отсюда следуют мероприятия по разработке правильных решений при проектировании сушильных установок и их конструктивном оформлении, а также рекомендации по рациональным приемам управления и регулированию процесса сушки.

Нетрудно установить количественное влияние каждого из показанных на рис. 14 факторов на изменение состояния 1 кг сушильного агента и выявить величину смещения треугольника сушки в соответствующих направлениях применительно к характерным сушильным процессам. В общем виде решение этой задачи следующее.

Примем количество циркулирующего по материалу воздуха *l* (кг/кг), воздухообмен камеры *l*₀ (кг/кг), теоретический расход тепла на нагревание воздуха в калорифере *Q*, количество испаряемой из материала влаги *D* (кг/ч) на камеру. Тогда теоретически потребное количество тепла на нагревание 1 кг воздуха будет [аналогично (44)]:

$$Q/Dl = I_1 - I_3. \quad (47)$$

Эта величина исходная. Она представляет собою масштабный отрезок 1—3 треугольника сушки (см. рис. 14). Аналогично определяют величины отрезков 1—2 и 2—3 для теоретиче-

ского процесса (рис. 14 и 12). Удельную величину теплотерьер на 1 кг воздуха определяют из соотношения (44).

Влияние неорганизованного воздухообмена выявится из коэффициента добавки воздуха для теоретического $n = (d_3 - d_0) / (d_2 - d_3)$ (см. рис. 12) и практического

$$n' = (d_3 - d_0) / (d'_2 - d_3)$$

процессов сушки.

Значения d_3 и d'_2 влагосодержания воздуха находят по фактическим показаниям психрометра в действующей камере без добавки в нее увлажнительного пара. Сопоставлением коэффициентов n и n' выявляют величину неорганизованного воздухообмена на 1 кг циркулирующего по материалу воздуха. Если неорганизованный воздухообмен превышает требуемый организованный, величину первого устанавливают методом дозированной добавки в камеру увлажнительного пара при закрытом организованном воздухообмене, соблюдая заданный процесс сушки.

Влияние добавки увлажнительного пара в рабочее пространство сушильной камеры на величину смещения процесса сушки (стрелка 7 или 8) при его регулировании выявляют, исходя из замеряемого количества добавляемого пара, отнесенного к 1 кг циркулирующего по материалу воздуха. На Id -диаграмме это отображается смещением точки 1 (см. рис. 14) вправо на соответствующую величину. Количественное значение этого смещения можно установить по показаниям психрометра, отсчитанным после пуска пара в камеру.

ГЛАВА 3. СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ КАК СУШИЛЬНОГО АГЕНТА

13. ОСОБЕННОСТИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ КАК СУШИЛЬНОГО АГЕНТА

Продукты сгорания различного топлива обладают всеми физическими свойствами нагретого воздуха как сушильного агента той же температуры и энтальпии. Наличие нейтрального газа — CO_2 и соответствующее снижение содержания O_2 в газах практически не влияют на скорость испарения влаги из материала.

Однако в теплотехническом, технологическом и технико-экономическом отношении продукты сгорания как сушильный агент характеризуются рядом существенных преимуществ по сравнению с нагретым воздухом. Основные из них следующие:

возможность достижения любой желательной температуры сушильного агента с резким сокращением продолжительности сушки, особенно в зимнее время, для тонких пыломатериалов, тарных дощечек, фанерного шпона, древесных частиц и т. п.;

лучшая степень использования тепла — расход топлива сокращается примерно в 2 раза по сравнению с расходом в установках, имеющих паровой калориферный нагрев воздуха;

значительное удешевление сооружения сушильных установок, не нуждающихся в котельных и в калориферах. Устройство топливоподачей примерно равно стоимости калориферного оборудования с теплопроводной и конденсатопроводной системами, таким образом, исключается стоимость котельной;

возможность быстрого строительства сушильных установок;

снижение (примерно на одну треть и даже больше) стоимости сушки материала при прямом использовании дешевого тепла продуктов сгорания по сравнению со стоимостью сушки в аналогичных условиях, но с паровым нагревом. Очевидно, что в случаях использования джоулева тепла и, тем более, при выделении тепла за счет высокочастотной энергии, затраты на сушку материала значительно возрастут. Стоимость 1 Дж (1 кал) тепла, выделяемого в сушильных камерах с газовым, паровым, электрическим и высокочастотным нагревом, возрастает примерно в соотношении 1:3:9:27, т. е. в 3⁰, 3¹, 3², 3³ раз.

К недостаткам продуктов сгорания как сушильного агента относят меньшую тепловую инерционность газового нагрева по сравнению с паровым калориферным, наличие CO₂ в атмосфере камеры с желательностью поддержания в ней разрежений и иногда возможность образования задымленных газов, загрязняющих материал.

Отмеченные недостатки принципиально неважны и преодоляемы. Они локализуются и даже исключаются соответствующими конструктивными решениями сушильной установки и соблюдением правильного режима сжигания топлива, в том числе древесного, а также при автоматическом регулировании топочного процесса.

При сушке большого количества пиломатериалов с высокой их начальной влажностью испаряется много влаги (по 200—300 кг из каждого кубического метра), кроме того, вследствие значительной продолжительности сушки (несколько суток и даже недель) возникают большие потери тепла (через ограждения, с горячими конденсатом и высушенной древесиной и другие). Поэтому на сушку древесины расходуется громадное количество тепла и, следовательно, топлива. В этих условиях правильный выбор экономичного и технологически эффективного вида топлива чрезвычайно важен.

Продукты сгорания в наибольшей мере отвечают предъявляемым к ним в лесосушильной технике требованиям. Они перспективны для более широкого применения в первую очередь на лесопильных заводах и в цехах, вырабатывающих пиломатериалы, а также на деревообрабатывающих производствах, располагающих лесосушильными туннелями. Во многих случаях продукты сгорания могут эффективно применяться также для обогрева сушильных камер (установок периодического действия), когда небольшое количество увлажнительного пара низкого давления может быть получено от дополнительного источника теплоснабжения (например, от чугунных котлов, применяемых для обогрева здания) или от котельной предприятия. Продукты сгорания повсеместно вытеснили калориферный нагрев сушильного агента в производстве древесностружечных плит и частично при изготовлении фанеры.

Для высушивания пиломатериалов применяются газовые сушильные установки, использующие древесные отходы и природный газ. На рис. 15 даны структурные схемы сушильных установок с различными преобразованиями тепловой энергии. На рис. 15, а изображена схема газовой сушильной установки, состоящей из двух звеньев преобразования тепла: 1) выделения тепла из сгорающего в топке в виде горячих продуктов сгорания топлива; 2) испарения этим теплом влаги из материала.

На рис. 15, б показана схема преобразования тепла в сушильной установке с огневым калорифером. Продукты сгорания, полученные в топке 1,

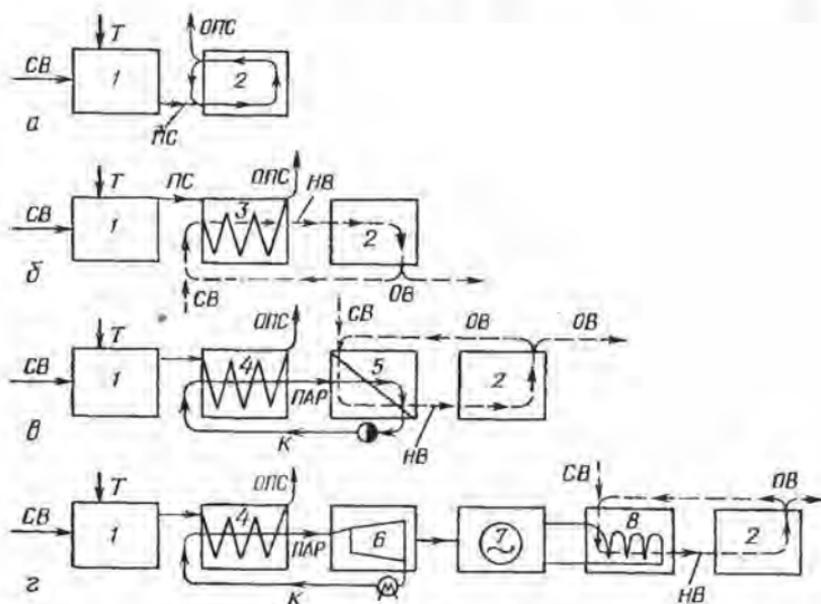


Рис. 15. Структурные схемы различных преобразований тепла в сушильных установках:

а — газовой с прямым использованием тепла; б — калориферной огневой; в — калориферной паровой; г — с электронагревом; 1 — топка; 2 — высушиваемый материал; 3 — огневой калорифер; 4 — паровой котел; 5 — паровой калорифер; 6 — паровая турбина; 7 — электрогенератор; 8 — электрокалорифер; Т — топливо; СВ — свежий воздух; НВ — нагретый воздух; ОВ — отработанный воздух; ПС — продукты сгорания; ОПС — отработанные продукты сгорания; К — конденсат

омывают стенку калорифера (например, газохода) 3, с другой стороны которой находится нагреваемый воздух, направляемый к высушиваемому материалу 2 для испарения влаги.

На рис. 15, в приведена тепловая схема сушильной установки с паровым обогревом. Продукты сгорания из топки 1 поступают к котлу 4, где охлаждаются и затем через дымовую трубу выбрасываются наружу, а образовавшийся в котле пар передается по трубам в паровой калорифер 5, из которого подогретый воздух, направляется к высушиваемому материалу 2. Следует отметить, что в котле 4 и калорифере 5 происходят взаимно противоположные тепловые процессы. Физическое назначение пара — переносить тепло из котла в калорифер, после которого конденсат обычно возвращается обратно в котел для повторения цикла теплопреобразования.

Схема на рис. 15, *г* дополняется паровой турбиной 6 для выработки из пара энергии. Затем электрогенератор 7 преобразует механическую энергию в электрический ток. Последний направляется в электросеть и из нее отбирается в электрокалорифер 8 или ПАП сушильной камеры для нагревания воздуха, поступающего, как и в предыдущих схемах, к высушиваемому материалу 2 для испарения влаги.

Все эти схемы применяются в промышленности.

В каждом из показанных на рис. 15 звеньев преобразования тепла неизбежно возникают тепловые потери. Общий тепловой КПД сушильной установки, включающей топку, тем ниже, чем больше промежуточных звеньев. Для сушильных установок по схемам на рис. 15, *а, б, в, г* тепловой КПД η по отношению к исходному топливу примерно равен 0,4—0,3—0,2—0,08, а для установки, обогреваемой токами высокой частоты, снижается до 0,04, т. е. в 10 раз. Следовательно, чем дороже вид применяемой энергии (последовательно: продукты сгорания — пар — электричество — ТВЧ), тем ниже КПД всей сушильной установки, т. е. хуже используется для сушки исходная теплота топлива и повышается стоимость сушки.

Для эффективного применения в производственных условиях относительно нового метода сушки пиломатериалов — с прямым использованием тепла (по схеме на рис. 15, *а*) необходимо ознакомиться со свойствами перспективного для массовой сушки древесины носителя тепловой энергии — продуктами сгорания, получаемыми преимущественно при сжигании древесных отходов, всегда имеющихся вблизи сушильного цеха.

К потоку продуктов сгорания, используемых для сушки древесины, предъявляются следующие основные требования. Газы должны быть бездымными, т. е. бесцветными, прозрачными — в них не должно быть продуктов неполного химического сгорания. Поток продуктов сгорания, подаваемый в сушильную камеру, должен быть стабильным во времени или регулируемым по заданной программе, так же как и его основные параметры в сушильных туннелях ($t, \Delta t$).

Определяющий параметр продуктов сгорания как сушильного агента — зинталыия. Чем она выше, тем шире возможности построения рациональных режимов сушки древесины различных сортиментов в газовых сушильных установках.

14. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА

Характеристика древесного топлива

Положительная особенность древесного топлива на лесопильных заводах и комбинатах — его непрерывное получение в виде отходов производства. Даже при использовании отходов в качестве вторичного сырья их удельная тепловая стоимость на лесопильном предприятии (в цехе) ниже стоимости других видов топлива, доставляемых из других районов.

Существенные положительные особенности древесного топлива как источника сушильного агента по сравнению с любым другим твердым топливом следующие: отсутствие серы; постоянный элементарный химический состав; высокий выход летучих (при пламенном сгорании древесины выделяется

около половины количества тепла этого топлива; малая зольность — около 1% для древесины сухопутной доставки и около 2% для сплавной; после- каемая в шлак зола (не считая сильно загрязненной, сплавной древесины).

Элементарный химический состав древесины (с зольностью $A=2\%$) в аб- солютно сухом состоянии ($W=0\%$) следующий, %: $C_p=49,2$; $H_p=6,1$; $O_p=42$; $N_p=0,7$; где индекс «р» означает рабочее топливо, поступающее для сгорания.

Влажность древесного топлива W (%) определяется по количеству влаги, отнесенной к массе влажной древесины, по формуле

$$W = 100 (m_1 - m_2)/m_1, \quad (48)$$

где m_1 — масса образца древесины во влажном состоянии; m_2 — масса того же образца, но высушенного в сушильном шкафу при $103 \pm 2^\circ \text{C}$ до аб- солютно сухого состояния.

В деревообработке влажность w древесины определяют по количеству влаги, вычисляемой по отношению к массе абсолютно сухой древесины m_2 ,

$$w = 100 (m_1 - m_2)/m_2. \quad (49)$$

Пересчет влажностей w и W выполняют по формулам, которые следуют из (48) и (49)

$$w = 100W/(100 - W) \text{ и } W = 100w/(100 + w). \quad (50)$$

Приведем численные соотношения между W и w :

W	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	75	80	100
w	0	5,3	11,1	17,7	25	33,3	42,9	66,7	100	150	300	400	∞

При малых значениях W и w расхождения между ними незначительны.

Главная характеристика топлива — удельная теплота сгорания Q_p^p , определяемая в лабораториях калориметрическим методом или вычисляемая по формуле Д. И. Менделеева:

$$Q_p^p = 339C + 1265H - 109,0 \text{ [или } Q_p^p = 81C + 300H - 26 \cdot O], \quad (51)$$

где Q_p^p — высшая удельная теплота сгорания, учитывающая теплоту парообразования (формула используется при расчете сушильных процессов), кДж/кг или ккал/кг.

Низшую удельную теплоту сгорания Q_n^p кДж/кг или ккал/кг вычисля- ют по формуле

$$Q_n^p = Q_p^p - 25,1 (9H + W) \text{ [или } Q_n^p = Q_p^p - 6(9H + W) \approx 4400 - 50W]. \quad (52)$$

По этой формуле учитывают теплоту сгорания топлива в топках котель- ных агрегатов. При этом теплоту пара продуктов сгорания $25 (9H + W)$ кДж/кг

[6(9H+W) ккал/кг] вычитают из теплоты сгорания топлива, поскольку она теряется, удаляясь через дымовую трубу наружу.

Для приближенных расчетов предлагаются формулы, получаемые для древесного топлива из (51):

$$Q_{\text{в}}^{\text{P}} = 198 (100 - W) = \frac{1\,980\,000}{100 + w} \quad (\text{кДж/кг})$$

$$[\text{или } Q_{\text{в}}^{\text{P}} = 47,2 (100 - W) = \frac{472\,000}{100 + w} \quad (\text{ккал/кг})]. \quad (53)$$

Расчет продуктов сгорания древесного топлива

Рассмотрим только химически полное (бездымное) сгорание топлива. Продукты химически неполного сгорания не допускаются к использованию в сушильных установках.

Коэффициент избытка воздуха α — основной показатель процесса горения представляет собой отношение действительного объема воздуха V , поступающего в топку, к теоретически необходимому его объему V_{T} : $\alpha = V/V_{\text{T}}$, (54). В нормально действующих топках всегда $\alpha > 1$.

Содержание CO_2 (в % по объему) в продуктах сгорания устанавливают газовым анализом. Величина CO_2 и коэффициент избытка воздуха α находятся в обратной зависимости. Максимальное содержание CO_2 для древесного топлива 20,2% при $\alpha = 1$.

$$\alpha = 20,2/\text{CO}_2 \quad \text{или} \quad \text{CO}_2 = 20,2/\alpha. \quad (55)$$

Чем больше α , тем выше содержание несгоревшего кислорода в продуктах сгорания и тем ниже содержание CO_2 .

Влажность W — основная характеристика древесного топлива. Так как элементарный химический состав сухой массы древесины постоянен, остаются неизменными соотношения O^{P} : H^{P} : O^{P} при различной ее влажности.

В теоретическом процессе ($\alpha = 1$) необходимое количество G_0 (кг/кг) воздуха для сгорания 1 кг твердого топлива, не содержащего серы, определяется по формуле

$$G = 0,115\text{O}^{\text{P}} + 0,342\text{H}^{\text{P}} - 0,043\text{O}^{\text{P}}. \quad (56)$$

Масса абсолютно сухого воздуха G_0 (кг/кг), необходимого для теоретического сгорания 1 кг древесины в зависимости только от ее влажности W определится учетом значений $\text{O}^{\text{P}} = 49,2(100 - W)/100$, $\text{H}^{\text{P}} = 6,1(100 - W)/100$ и так далее и составит

$$G_0 = 0,121 \cdot 49,2(100 - W)/100 = 0,0596(100 - W). \quad (57)$$

Объем воздуха V_0' ($\text{м}^3/\text{кг}$) в расчетах топочных процессов приводят к нормальным условиям [при его давлении 101 300 Па (760 мм рт. ст.) и 0°C]. Для теоретического сгорания 1 кг древесины

$$V_0' = 0,0596(100 - W)/1,293 = 0,0461(100 - W). \quad (58)$$

Масса водяного пара G_n (кг/кг), образующегося при сгорании 1 кг древесины, также устанавливается в зависимости только от ее влажности. Если иметь в виду, что $H^p = 6,1(100 - W)/100$, то

$$G_n = \frac{9H + W}{100} = \frac{9 \cdot 6,1 \frac{100 - W}{100} + W}{100} = 0,549 + 0,0045W. \quad (59)$$

Объем пара V_n' (м³/кг) в нормальных условиях равен

$$V_n' = G_n' / \rho_n = G_n' / 0,804 = 0,684 + 0,0056W, \quad (60)$$

где 0,804 — приведенная плотность пара при $p = 101\,300$ Па (760 мм рт. ст.) и $t = 0^\circ \text{C}$.

В продуктах сгорания, кроме того, будет находиться пар, поступивший в топку с воздухом, имевшим влагосодержание d_0 . Масса этого пара G_n'' , кг/кг топлива равна

$$G_n'' = \alpha G_0 d_0 / 1000 = 0,0000596 \alpha d_0 (100 - W). \quad (61)$$

Общая масса пара G_n (кг/кг) в продуктах сгорания на 1 кг топлива определится (кг/кг):

$$G_n = G_n' + G_n'' = 0,549 + 0,0045W + 0,0000596 \alpha d_0 (100 - W). \quad (62)$$

Масса продуктов сгорания (без пара) $G_{c,r}$ на 1 кг сжигаемой древесины складывается из массы сгоревшего топлива (1 кг) и поступившего в топку воздуха αG_0 за вычетом золы A и отдельно учитываемого пара $(9H + W)/100$, кг/кг

$$G_{c,r} = 1 + \alpha G_0 - (A + 9H + W)/100. \quad (63)$$

Подставляя значения $A = 2(100 - W)/100$ и $(9H + W)/100 = 0,549 + 0,0045W$ в последнюю формулу и преобразуя ее получим

$$G_{c,r} = (0,0043 + 0,0596\alpha)(100 - W). \quad (64)$$

Если вместо $100 - W$ подставить $10\,000/(100 + w)$ из (50), получим более простое соотношение для массы продуктов сгорания из 1 кг топлива, как функции α и w :

$$G_{c,r} = (43 + 596\alpha)/(100 + w). \quad (65)$$

Влагосодержание продуктов сгорания d (г/кг) представляет отношение массы пара (62) к массе продуктов сгорания (64). Упрощая это отношение и подставляя w (50) вместо W , получим

$$d = \frac{\frac{9210 + 75,7W}{100 - W} + \alpha d_0}{0,072 + \alpha} = \frac{92,1 + 1,678w + \alpha d_0}{0,072 + \alpha}. \quad (66)$$

При отсутствии парового дутья величина $\alpha d_0 / (0,072 + \alpha)$ незначительно отличается от d_0 , тогда (66) упрощается:

$$d = \frac{92,1 + 1,678w}{0,072 + \alpha} + d_0 \quad (66')$$

Для теоретического сгорания топлива ($\alpha=1$) приращение влагосодержания продуктов сгорания по сравнению с влагосодержанием воздуха напишется в виде уравнения прямой:

$$d - d_0 = 86 + 1,565w. \quad (67)$$

Как видно, при сжигании абсолютно сухой древесины ($w=0$) приращение влагосодержания продуктов сгорания $d-d_0$ будет 86 г/кг. Если принять в среднем $d_0=10$ г/кг, $d=96$ г/кг. При обычной влажности древесного топлива $W=50\%$ (т. е. $w=100\%$) величина $d-d_0$ составит $86+156=242$ г/кг, т. е. будет значительна. С повышением $\alpha>1$ величина $d-d_0$ снизится за счет разбавления газов, подаваемых в топку избыточным воздухом с малым влагосодержанием d_0 .

Энтальпия продуктов сгорания по своему определению (53) и (64) вывядится из соотношения

$$I = (Q_{\text{в}}^{\text{п}} + \alpha G_0 I_0) / G_{\text{с.г.}} \quad (68)$$

Произведение $\alpha G_0 I_0$ показывает энтальпию воздуха, поступающего в топку для сгорания 1 кг топлива. Физическая теплота топлива может не учитываться. Подставляя в (68) значения $Q_{\text{в}}^{\text{п}}$ (53), G_0 (57) и $G_{\text{с.г.}}$ (64), получим

$$I = 4,19 \frac{793 + \alpha I_0}{0,072 + \alpha} \text{ (кДж/кг)} = \frac{793 + \alpha I_0}{0,072 + \alpha} \text{ (ккал/кг)}. \quad (69)$$

Отсюда следует:

$$\alpha = \frac{4,19 \cdot 793 - 0,072 I_0}{I - 4,19 I_0}. \quad (70)$$

В (70) отсутствует W , следовательно, энтальпия газов, образующихся при полном сгорании древесного топлива, не зависит от его влажности, а определяется коэффициентом избытка воздуха α и в небольшой мере энтальпией воздуха I_0 , поступающего в топку. Объяснение независимости I от W заключается в том, что здесь теплота сгорания учитывается высшая $Q_{\text{в}}^{\text{п}}$, т. е. теплота пара включается в энтальпию продуктов сгорания, а их количество $G_{\text{с.г.}}$ пропорционально уменьшается с повышением W . Формула (69) достаточно точно напишется в виде

$$(I - I_0) (0,072 + \alpha) = 4,19 \cdot 793 = 3320 \text{ (кДж/кг)} = 793 \text{ (ккал/кг)}. \quad (71)$$

Таким образом, четко выражена обратная (гиперболическая) зависимость $I(\alpha)$, т. е. каждому значению α соответствует единственное значение I . При $\alpha=1$ энтальпия будет максимальной. Если принять $I_0=10$, тогда

$$I_{\text{max}} = 4,19 \cdot 793 / (0,072 + 1,0) = 3100 \text{ кДж/кг (740 ккал/кг)}. \quad (72)$$

Такова максимально возможная энтальпия продуктов сгорания при полном химическом горении древесины всех пород с любой влажностью;

отклонения для очень смолистой или сплавной древесины не выходят за пределы неточностей, допускаемых в теплотехнических расчетах.

Энтальпия продуктов сгорания, а равно и воздуха при влагосодержании 20–400 г/кг достаточно просто выявляется по показанию мокрого термометра t_m , психрометра и, наоборот, величину t_m находят по значению I :

$$I = 10^{0,023t_m + 1,302} \text{ кДж/кг. } t_m = 43,5 \lg I - 56,6^\circ\text{C}$$

$$[\text{или } I = 10^{0,023t_m + 0,68} \text{ ккал/кг, } t_m = 43,5 \lg I - 29,6^\circ\text{C}]. \quad (73)$$

Например, если $I = 419$ кДж/кг (100 ккал/кг), то $t_m = 43,5 \cdot 2,622 - 56,6 = 57,4^\circ\text{C}$.

Температура t ($^\circ\text{C}$) продуктов полного сгорания, без учета излучения газов и физической теплоты самого топлива, определяется по формуле

$$t = (Q_{\text{H}}^{\text{P}} + \alpha G_0 J_0) / (G_{\text{с.г}} c_{\text{с.г}} + G_{\text{H}} c_{\text{H}}). \quad (74)$$

где $c_{\text{с.г}}$ — средняя массовая теплоемкость сухого газа; c_{H} — средняя массовая теплоемкость пара (табл. 4); Q_{H}^{P} — низшая теплота сгорания топлива (52).

Подставляя в (74) значение Q_{H}^{P} , после преобразований получим зависимость $t(w)$

$$t = \frac{737 - w + \alpha J_0}{(0,072 + \alpha) c_{\text{с.г}} + (0,0922 + 0,0168w + 0,001\alpha d_0) c_{\text{H}}}. \quad (75)$$

4. Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном давлении

Температура, $^\circ\text{C}$	Воздух, кДж/(кг·К) [ккал/(кг· $^\circ\text{C}$)]	CO_2 , кДж/(кг·К) [ккал/(кг· $^\circ\text{C}$)]	H_2O , кДж/(кг·К) [ккал/(кг· $^\circ\text{C}$)]
0	1,003 [0,240]	0,817 [0,195]	1,860 [0,444]
100	1,010 [0,241]	0,916 [0,218]	1,890 [0,451]
200	1,024 [0,244]	0,995 [0,238]	1,939 [0,463]
300	1,045 [0,250]	1,060 [0,253]	2,000 [0,477]
400	1,068 [0,255]	1,114 [0,266]	2,065 [0,493]
500	1,092 [0,260]	1,158 [0,276]	2,133 [0,509]
600	1,115 [0,266]	1,196 [0,286]	2,203 [0,525]
700	1,136 [0,271]	1,228 [0,293]	2,273 [0,542]
800	1,155 [0,276]	1,254 [0,300]	2,344 [0,560]
900	1,171 [0,279]	1,277 [0,305]	2,413 [0,576]
1000	1,184 [0,282]	1,296 [0,310]	2,479 [0,592]
1100	1,197 [0,285]	1,313 [0,314]	2,542 [0,607]
1200	1,208 [0,288]	1,326 [0,317]	2,600 [0,620]

Формула (75) показывает, что температура продуктов сгорания древесины зависит в основном от ее влажности и коэффициента избытка воздуха. Эти зависимости представлены графически на рис. 16. На диаграмме нане-

сены также пунктирные прямые $G_{с.г}$ массы сухих газов, получаемых при сгорании 1 кг топлива; кривые α и CO_2 совпадают по направлению. Слева нанесены совмещенно шкалы влажностей древесины W и w . При $W=88\%$ температура горения древесины равна нулю — вся теплота сгорания сухой части топлива расходуется на скрытую теплоту парообразования влаги; на рис. 16 это показано общим полюсом A на оси ординат, где $t_r=0^\circ C$.

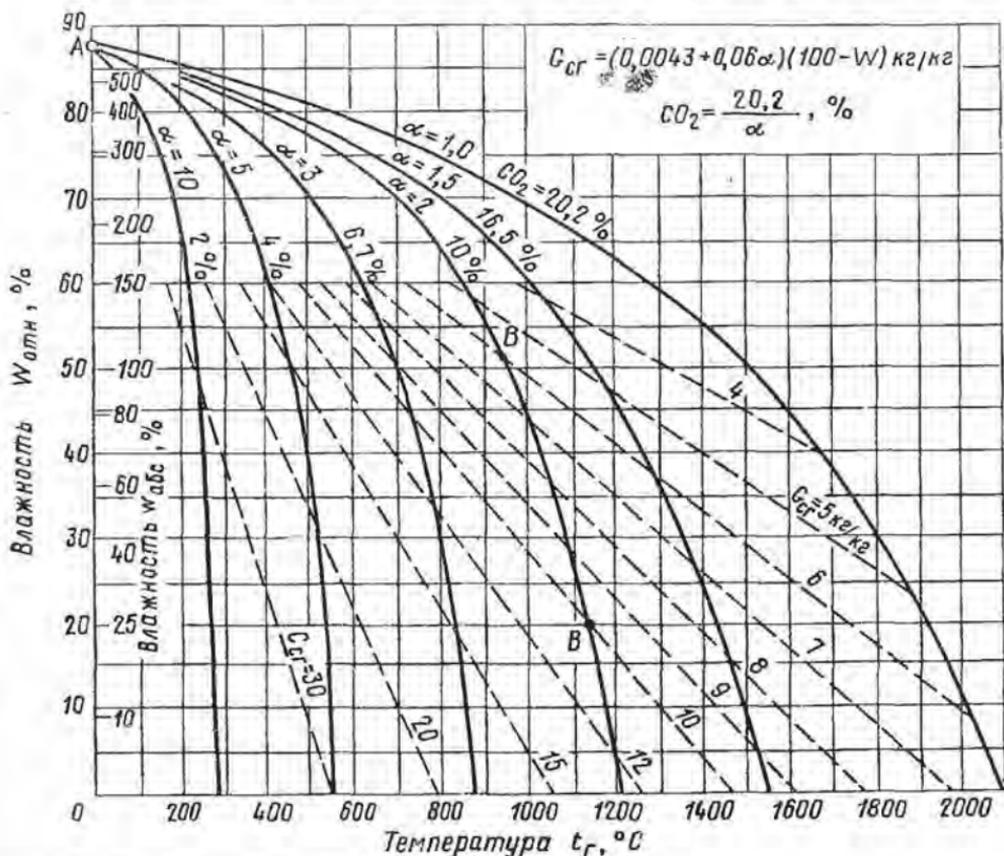


Рис. 16. Параметры продуктов сгорания при теоретическом горении древесины:

α — коэффициент избытка воздуха; CO_2 — содержание двуокиси углерода в % по объему; $G_{с.г}$ — масса сухих газов в килограммах на 1 кг сгоревшего топлива

Расчетный пример процесса полного химического сгорания 1 кг древесного топлива влажностью $W=50\%$ ($w=100\%$) при $\alpha=2$, $I_0=42$ кДж/кг (10 ккал/кг) и $d_0=9$ г/кг (точка B на рис. 16).

Количество воздуха для сгорания топлива по (57) и (58):

$$G_0 = 0,0596(100 - W) = 0,0596 \cdot 50 = 2,98 \text{ кг/кг};$$

$$V'_0 = 0,061(100 - W) = 0,0461 \cdot 50 = 2,30 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Масса водяного пара в продуктах сгорания по (62):

$$G_n = 0,549 + 0,00451W + 0,00006\alpha d_0(100 - W) = 0,549 + 0,225 + 0,054 = 0,828 \text{ кг/кг}.$$

Количество сухих продуктов сгорания по (64):

$$G_{cr} = (0,0043 + 0,0596\alpha)(100 - W) = (0,0043 + 0,0596 \cdot 2)50 = 6,20 \text{ кг/кг.}$$

Влагосодержание продуктов сгорания по (67):

$$d = \frac{92,1 + 1,678w}{0,072 + \alpha} + d_0 = \frac{92,1 + 1,678 \cdot 100}{0,072 \cdot 2} + 9 = 134 \text{ г/кг.}$$

Энтальпия продуктов сгорания по (69):

$$I = 4,19 \frac{793 + \alpha I_0}{0,072 + \alpha} = 4,19 \frac{793 + 2 \cdot 10}{0,072 + 2} = \frac{1640 \text{ кДж/кг}}{(392 \text{ ккал/кг})}$$

Содержание двуокиси углерода по (55): $\text{CO}_2 = 20,2/\alpha = 20,2/2 = 10,1\%$.

Температура продуктов сгорания [по (75) или по диаграмме рис. 16]: $t = 960^\circ \text{C}$.

При тепловом КПД топки 0,8 практическая температура газов будет около 770°C .

15. ПОСТРОЕНИЕ Id_α -ДИАГРАММЫ ДЛЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА

Построение линий $W = \text{const}$

В практике прямого использования тепла продуктов сгорания топлива для сушки древесины возникает необходимость в получении газов с определенными параметрами, с тем чтобы они образовали сушильный агент заданного режима сушки применительно к имеющимся различным пиломатериалам. При этом должны быть установлены оптимальные параметры процесса горения топлива, а также сушки древесины, т. е. комплексно нормализованы как эксплуатация топки, так и управление процессом сушки, включая технологию и технику обслуживания сушильной установки.

Ранее было показано, что с помощью Id -диаграммы (см. § 10—12) можно просто и наглядно определять и анализировать параметры сушильного агента и тепловлажностный режим протекания процесса сушки. Желательно, поэтому развить Id -диаграмму с тем, чтобы на ней можно было нанести также и процесс горения топлива, а затем графически или графоаналитически объединить этот комплексный процесс — выделения тепла, с теплообменным процессом — сушки материала полученными продуктами сгорания.

Для влагосодержания d и энтальпии I газов получены формулы (66) и (69). Подставляя значение $0,072 + \alpha$ из первой формулы во вторую, будем иметь I (кДж/кг):

$$I = \frac{4,19(793 + \alpha I_0)d}{92,1 + 1,678w + \alpha d_0}. \quad (76)$$

Отсюда следует, что основной параметр I продуктов сгорания зависит от отношения d/w и незначительно от αd_0 и αI_0 . Если принять $d_0 = 0$ и $I_0 = 0$, напишем:

$$I = \frac{d}{0,0276 + 0,000505w} \text{ кДж/кг} \left(\frac{d}{0,116 + 0,00212w} \text{ ккал/кг} \right). \quad (77)$$

Для предельного случая, когда влажность топлива равна нулю,

$$I = 36,2d \text{ кДж/кг (8,61d ккал/кг)}. \quad (78)$$

Это есть уравнение прямой OB (рис. 17), проходящей через начало координат O , с угловым коэффициентом 36,2 (8,61) на высокотемпературной Id -диаграмме в прямоугольной системе координат [10].

Установленные величины по (72) $I_{\max} = 3100$ кДж/кг (740 ккал/кг) и $d = 86$ г/кг определяют на Id -диаграмме точку B процесса горения абсолютно сухого топлива при $d_0 = 0$, $I_0 = 0$ и $\alpha = 1$.

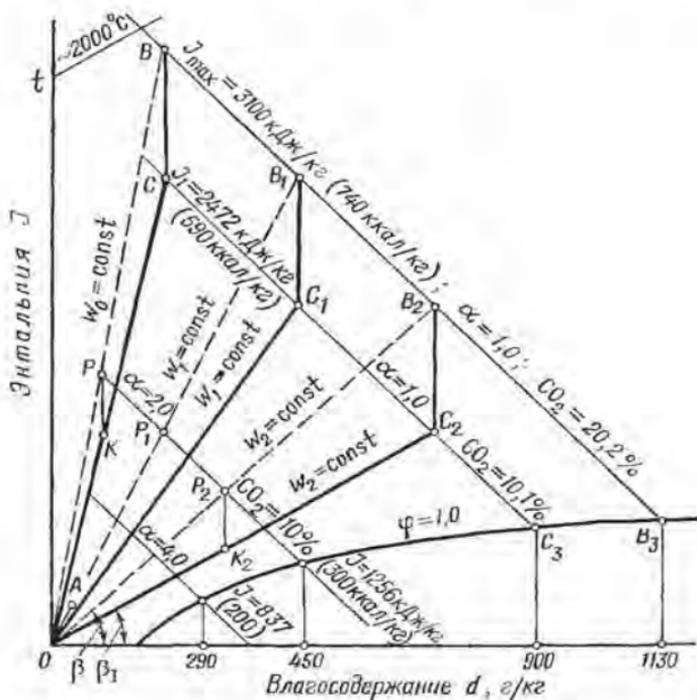


Рис. 17. Графическое изображение на $Id\alpha$ -диаграмме:

процессов теоретического горения топлива различной влажности W_0, W_1, W_2 ; максимальной энтальпии I_{\max} газон при $\alpha=1$; теплотерьер BC, B_1C_1, B_2C_2 ; действительного горения топлива OC, OC_1, OC_2 ; линий $\alpha > 1 - \text{const}$ и $CO_2 = \text{const}$; углов наклона β , линии теоретического горения OB_2 и β_1 — практического горения OC_2

Процесс смешения двух состояний газов изображается на Id -диаграмме прямой линией (см. § 11). Поэтому непрерывно добавляя к потоку продуктов сгорания воздух с его состоянием d_0 и I_0 , т. е. увеличивая коэффициент избытка воздуха α , получим прямую BO , соединяющую точку B (горения топлива при $\alpha=1$) с точкой O (состояния добавляемого воздуха). Таким образом выявляется линия BO горения абсолютно сухого топлива $W_0=0=\text{const}$ при различных коэффициентах избытка воздуха α .

При повышении α , т. е. добавке воздуха O , точка B опускается по линии BO в точку P . Наконец, при $\alpha=\infty$, т. е. когда разбавляемые воздухом газы будут представлять воздух, точка P совместится с точкой O .

При максимально допустимой влажности топлива $w=200\%$, т. е. $W=66,7\%$, энтальпия газов определится

$$I = 7,79d \text{ кДж/кг} \quad (1,86d \text{ ккал/кг}), \quad (79)$$

где 7,79 — угловой коэффициент прямой $w=200\%$.

Таким методом на заранее подготовленную Id -диаграмму, с температурой выше 1000°C , можно нанести прямые горения древесного топлива любой влажности $W(w)=\text{const}$. Приняв древесное топливо с определенными интервалами влажности и нанеся указанные линии на диаграмму, получим семейство прямых BO, B_1O, B_2O сгорания топлива разной влажности (см. рис. 17). Каждая прямая (пунктир), исходящая из начала координат, характеризуется своим угловым коэффициентом β , в зависимости от влажности топлива, и заканчивается на энтальпии $I_{\text{max}}=3100 \text{ кДж/кг}$ (740 ккал/кг). Газы с меньшей энтальпией (за счет добавки холодного воздуха, но без теплопотерь) характеризуются величиной α больше единицы (точки P, P_1, P_2).

Построение линий $\alpha=\text{const}$ и $\text{CO}_2=\text{const}$

Линии $\alpha=\text{const}$ и $I=\text{const}$ параллельны между собой, так как каждому значению α соответствует определенная величина I (69), (70), независимо от положения точки состояния газов на линии $I=\text{const}$. Количественные их соотношения взаимно обратны: наибольшему значению I соответствует минимальное α (1), а наименьшему $I=0$ — наибольшее α (∞).

Подставляя в (69) значение α из (55) получим в кДж/кг:

$$I = \left(4,19 \cdot 793 - \frac{20,2I_0}{\text{CO}_2} \right) / \left(0,072 + \frac{20,2}{\text{CO}_2} \right). \quad (80)$$

Если принять $I_0=0$, напишем

$$I = 4,19 \cdot 793 / \left(0,072 + \frac{20,2}{\text{CO}_2} \right) \text{ или} \quad (81)$$

$$I/\text{CO}_2 = 164 - 0,0149I \text{ кДж/кг} \quad (39,2 - 0,00356I \text{ ккал/кг}). \quad (82)$$

Следовательно, каждому проценту содержания CO_2 в продуктах сгорания соответствует примерно 160 кДж/кг (39 ккал/кг) их энтальпии (без учета теплопотерь). Параметром CO_2 достаточно точно можно выявлять энтальпию газов в производственных сушильных установках для оценки состояния сушильного агента или, наоборот, рассчитывать содержание CO_2 по известной энтальпии (см. рис. 9, б).

Таким образом, Id -диаграмма, дополненная вспомогательными линиями W, CO_2, α , представляет в виде $Id\alpha$ -диаграммы необходимое пособие для расчета и анализа процессов полного химического горения топлива и последующей сушки материала полученными продуктами сгорания.

Построение линий $g=\text{const}$

На $Id\alpha$ -диаграмме можно нанести дополнительное семейство прямых — удельного расхода g топлива для образования 1 кг газов. Величина g (кг/кг) обратна значению массы сухих газов $G_{\text{с.г.}}$, получаемых при сжигании 1 кг топлива (64):

$$g = 1/G_{c,r} = 1/[I(0,0043 + 0,0596\alpha)(100 - W)]. \quad (83)$$

Подставляя значения α из (69), а $100 - W$ (из 50), получим:

$$g = \frac{I}{(47,2 + 0,0596\alpha I_0)(100 - W)} = \frac{I(100 + w)}{472\,000 + 596\alpha I_0}. \quad (84)$$

Отсюда следует, что удельный расход топлива g зависит от энтальпии (влияние α), а также от влажности топлива. При $I_0 = 0$ для каждого значения влажности топлива $w = \text{const}$ отношение его удельного расхода к энтальпии газов есть величина постоянная, т. е. $g/I = \text{const}$.

Линии $g = \text{const}$ близки к вертикалям. Чтобы не загромождать диаграмму, нанесут на ее полях сверху и внизу концевые участки этих линий. В поле диаграммы значения g отсчитывают с помощью длинной линейки.

Расчетную $I d \alpha$ -диаграмму строят с учетом средних параметров воздуха, поступающего в топку, $I_0 = 42$ кДж/кг (10 ккал/кг) и $d = 9$ г/кг, что соответствует обычным для топочных помещений значениям $t_0 = 20^\circ \text{C}$ и $\varphi = 0,6$. В этих условиях полюс всех линий сгорания топлива $W = \text{const}$ из начала координат сместится в точку A (см. рис. 17).

В расчетной $I d \alpha$ -диаграмме учитываются потери тепла через стенки топки и газоходов. Величина потерь зависит от конструкции топки, ее тепловой нагрузки, а также от температуры газов (т. е. α и W). Они остаются постоянными при стабильном режиме работы топки. С увеличением нагрузки топки тепловой ее КПД η возрастает. Для построения расчетной $I d \alpha$ -диаграммы (см. приложение 2 на вкладке) принята средняя величина КПД топки с газоходом $\eta = 0,8$.

Величина теплопотерь не влияет на влагосодержание продуктов сгорания, а также коэффициент избытка воздуха, значение CO_2 и температуру точки росы. Понижается лишь t и I (отрезки BC , B_1C_1 и B_2C_2 на рис. 17). Энтальпия газов при этом снижается до значения I' по (69). Если принять $I_0 = 0$, $\alpha = 1$ и $\eta = 0,8$, получим $I' = 2500$ кДж/кг (592 ккал/кг).

Практически максимальная (по энтальпии) точка B процесса сгорания топлива переместится вниз по вертикали BC в точку C . Также сместятся вниз все точки линии OB пропорционально их энтальпии. Например, точка P в точку K , точка P_2 — в K_2 и т. д. При этом линия процесса горения $W = \text{const}$ нанесется в виде прямой OC . Соответственно изменится положение всех линий $W = \text{const}$ OC_1 , OC_2 для нной влажности топлива. Зависимость $I'(w, d, \eta)$ напишется в виде

$$I' = \frac{(793 + \alpha I_0) d}{92,1 + 1,678w + \alpha d_0} \eta. \quad (85-86)$$

16. НАНЕСЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА $I d \alpha$ -ДИАГРАММУ

Тепловые схемы сушильных установок

Рассмотрим подробнее схему газовой установки (рис. 18, а, б). Тепло образуется в топке, где сгорает твердое, жидкое или газообразное топливо. Раскаленные газы 3 температурой 800—1000°С добавляются к отработавшему, увлажненному газу 2, выходящему из штабеля материала б и подогревают его, восстанавливая его сушильный потенциал. Полученный таким образом сушильный агент 1 направляется с противоположной стороны шта-

беля внутрь его, где отбирает влагу из материала и в отработанном состоянии 2, в основной своей массе, повторно подогревается добавкой к нему газа 3 из топки с непрерывным повторением цикла. Часть отработанного сушильного агента 2, равная по массе добавке газа 3, но в несколько десятков раз меньше количества рециркулирующих отработанных газов, удаляется через трубу наружу. Температура t_1 смеси газа 1 перед материалом 6 ввиду малой относительной добавки газа 3 немного выше температуры t_2 отработанных газов.

На рис. 18, в приведена для сопоставления схема паровой сушильной установки. Здесь продукты сгорания 3 поступают к котлу 7, превращая воду

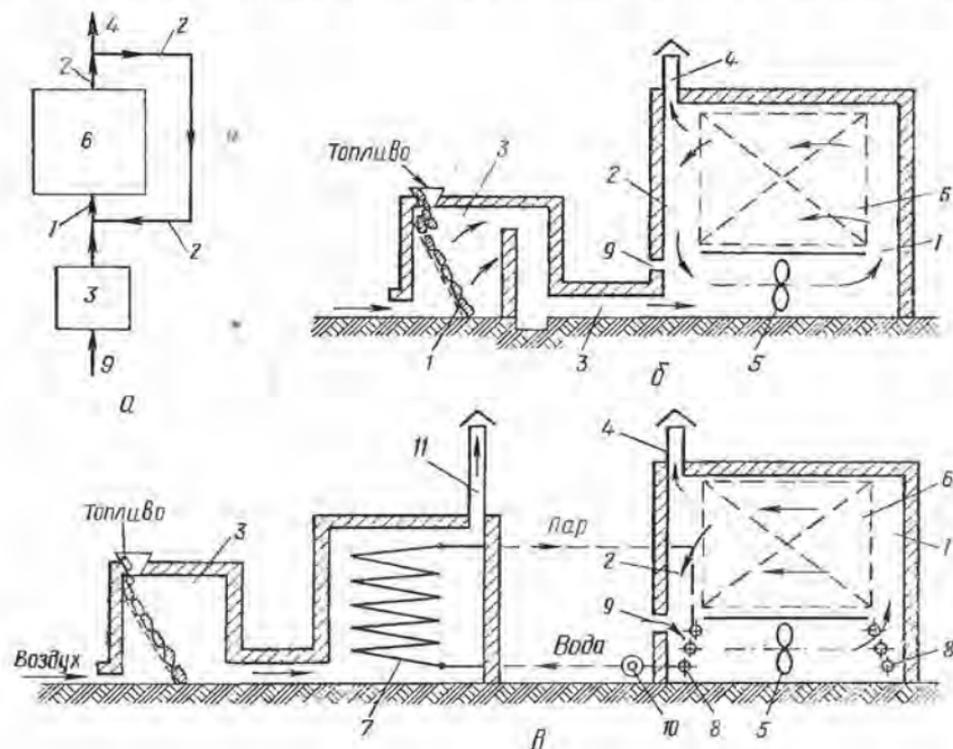


Рис. 18. Схема газовой и паровой сушильных установок:

а — принципиальная схема газовой сушильной установки; б — схема газовой установки; в — схема паровой установки; 1 — нагретый сушильный агент, направляемый к материалу; 2 — отработанный сушильный агент — из материала; 3 — продукты сгорания; 4 — отработанный сушильный агент, удаляемый наружу; 5 — вентилятор; 6 — высушиваемый материал; 7 — паровой котел; 8 — паровой калорифер; 9 — подача свежего воздуха; 10 — конденсатотводчик; 11 — дымовая труба котла

в пар, и, не полностью еще охлажденные, выбрасываются через дымовую трубу 11 наружу. Полученный в котле пар поступает в калорифер 8 сушильной камеры, где через стенки калорифера нагревает воздух, поступающий в штабель материала 6. При этом возникают потери тепла с дымовыми газами через трубу 11, с горячим конденсатом, через обмуровку котла и др.

В отличие от паровой сушильной установки в газовой отсутствуют взаимно противоположные процессы теплопреобразований (в котле и в паровом калорифере). Нагретые топочные газы, подмешиваясь к рециркулирующим,

поступают непосредственно в сушильную камеру для испарения влаги из материала.

Рассмотрим протекающие при этом тепловлажностные процессы на $I\alpha$ -диаграмме (см. рис. 17). Состояние воздуха, поступающего в топку, показано точкой A , точка B отображает параметры газа при теоретическом (без теплопотерь) горении топлива влажностью $W_0=0$, при $\alpha=1$. Охлаждение полученного газа B в результате теплопотерь топки и газоходов изображалось вертикальным отрезком BC . Значение α в точке C будет таким же как и в точке B поскольку к газам B воздух не добавляется.

В условиях реальной влажности топлива $W > 0$ состояние газа при $\alpha=1$ без теплопотерь определится точкой B_1 , а при повышенной влажности топлива — точкой B_2 на той же линии $I_{\max}=\text{const}$, а после частичной потери тепла в топке и газоходах — точками C_1 и C_2 . Отрезки BC , B_1C_1 и B_2C_2 будут равны, если теплопотери $I_{\max}-I_1$ в этих процессах одинаковы. Механическая неполнота сгорания древесного топлива практически отсутствует. Следовательно, линия $CC_1C_2(I_1=\text{const})$ представляет одновременно линию постоянного КПД топки и газоходов при сжигании древесного топлива различной влажности; это есть также линия $\alpha=1$ и $\text{CO}_2=20,2\%$.

Изменение состояния продуктов сгорания в процессе сушки

Для правильного регулирования процесса сушки при эксплуатации сушильной установки необходимо располагать техническими данными об изменениях состояния газов по их тракту — от камеры горения топки до удаления наружу отработанного сушильного агента, испарившего влагу из материала.

Температура продуктов сгорания теоретического процесса понижается (без добавки воздуха) вследствие лучеиспускания газов и затем потерь тепла стенками топки и газоотходов. Влагосодержание газов при этом обычно остается постоянным, если нет добавки влаги (например, от грунтовых вод) или ее уменьшения (вследствие конденсации влаги). Неизменным будет и содержание CO_2 . На $I\alpha$ -диаграмме процесс «сухого» охлаждения газов отобразится отрезком BC (рис. 19, а), направленным из точки B вниз по линии $d=\text{const}$. Положение точки C может быть намечено ориентировочными расчетами и более точно зафиксировано в производственных условиях методом измерений.

Не менее существенный фактор понижения температуры газов и одновременно их влагосодержания — это добавка к ним холодного воздуха, подсазываемого в зоне разрежения сушильной установки, через кладку топки, газоходов, неплотности шиберов (например, обратной тягой воздуха из дымовой трубы топки через «закрытый» ее шибер), двери сушильного туннеля на загрузочном его конце и т. п.

Такая добавка воздуха отобразится на $I\alpha$ -диаграмме отрезком CH (рис. 19, а). Масса добавляемого воздуха A на 1 кг газов C определится отношением отрезков CH/HA . Например, если на 1 кг газов C добавляется 1 кг воздуха A , точка состояния разбавленных газов H будет находиться на середине отрезка CA (в точных расчетах учитываются теплоемкости газов и воздуха, а коэффициент α примерно равен 2 [см. (63)]. При этом температура газов C снизится почти в 2 раза.

Количество добавленного к газам воздуха, т. е. повышение α газов, практически устанавливается по уменьшению легко измеряемого содержания в них CO_2 (55), или по снижению их температуры (если на коротком участке тракта газов теплопотери незначительны). Одновременно с понижением температуры уменьшается энтальпия разбавляемых воздухом продуктов сгорания, при этом часто снижается их ценность как сушильного агента.

Основной фактор снижения температуры газов $t_H - t_Y$ (рис. 19, а) — их испарительное охлаждение по линии $I = \text{const}$ — отрезок HU . Оно осуществляется путем добавления продуктов сгорания, характеризующихся точкой H , к рециркулирующему отработанному сушильному агенту Y и последующего испарения полученной смесью X влаги в штабеле высушиваемого

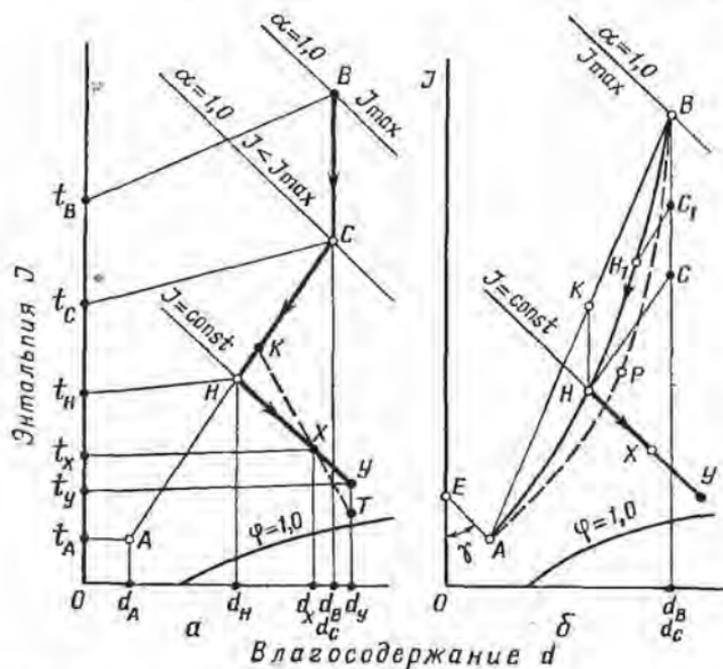


Рис. 19. Изменение состояния продуктов сгорания в сушильной установке: *a* — при сосредоточенных теплопотерях и добавке воздуха; *б* — при равномерном нарастании теплопотерь и добавке воздуха; BC — охлаждение газов через ограждения; CH — охлаждение и добавка холодного воздуха; HU — охлаждение при испарении влаги; ординаты $t_B, t_C, t_H, t_X, t_Y, t_A$ и абсциссы d_B, d_C, d_H, d_X, d_Y и d_A показывают температуры и соответственно влагосодержания в точках B, C, H, X, Y и A

материала (процесс сушки XU). Этот вид охлаждения газов при поглощении ими влаги составляет основную цель их применения для сушки древесины.

Для наглядности графического изображения рассматриваемые явления показаны на рис. 19, а в виде трех последовательных процессов: охлаждения газов стенками топки и газоходов — отрезок BC , охлаждения добавкой холодного воздуха — CH и испарительного охлаждения HU . Однако в действительности первые два процесса протекают одновременно, что на рис. 19, б нанесено в виде кривой BH .

Действительную линию BH охлаждения газов строят более точно по

опытным данным. Откладывают отрезок BC , соответствующий небольшому участку тракта охлаждающихся газов и из точки C_1 наносят отрезок C_1H_1 добавки к ним на этом участке воздуха (по направлению прямой C_1A). Полученная точка H_1 и будет находиться на искомой кривой BH_1H . При пропорциональном протекании этих двух процессов охлаждения газов, когда $BC_1/BC = C_1H_1/CH$, кривая BH_1H , продленная до точки A , будет ветвью параболы BH_1HA с осью AE , расположенной под углом γ к оси ординат.

Из построения рис. 19, б видно, что отрезки C_1H_1 и CH не параллельны, поэтому суммарное снижение энтальпии не может быть получено по правилу параллелограмма. Следует также иметь в виду, что при охлаждении газов через стенки топки и газоходов количество газов (в точках B, C_1, C) остается неизменным (1 кг), в то время как при их охлаждении добавкой воздуха (по линиям C_1H_1, CH) масса газов возрастает, составляя для точки K

$$1 + \frac{BK}{KA} \text{ кг.}$$

Нанесение процесса сушки на $I d \alpha$ -диаграмму

Коэффициент избытка воздуха станет больше единицы и точка состояния газа C_1 перейдет в точку M , если к частично охладившимся в топке газам с состоянием C_1 (рис. 20) добавить воздух (через поддувало топки, неплотности ее кладки, заслонки и т. п.). Линия AM будет представлять геометрическое место точек действительного (с учетом до точки C_1 теплотеря) процесса полного горения древесины влажностью W_1 при $\alpha > 1$.

Наносят и рассчитывают процесс сушки по $I d \alpha$ -диаграмме следующим образом. Обозначается точкой X состояние сушильного агента, направляемого к материалу, в соответствии с заданным для него режимом сушки. Затем показывается точкой Y состояние отработанного сушильного агента, выходящего из штабеля (слоя, барабана и т. п.) материала. Так как газ в состоянии X представляет смесь вышедшего из материала отработанного сушильного агента с продуктами сгорания, полученными при сжигании топлива влажностью W_1 , то второй компонент смеси X должен находиться на пересечении прямой UX с линией $W_1 = \text{const}$. Следовательно, этот компонент определяется точкой H , находящейся на прямой UXH . По закону смешения (см. рис. 10) количество раскаленных продуктов сгорания (по их массе) H (см. рис. 20)

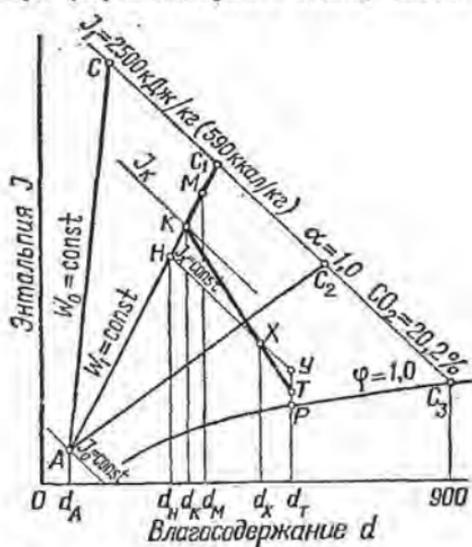


Рис. 20. Процессы на $I d \alpha$ -диаграмме:

C_1K — добавление воздуха A к газам C_1 ; KX — примешивание газов K к отработанным газам T ; XU — теоретический процесс испарения влаги из материала; XT — действительный процесс сушки.

характеризуется величиной отрезка UX , а рециркулирующих из материала, отработанных газов $У$ — величиной отрезка XH .

Удельные теплотери сушильной камеры могут быть отнесены к 1 кг сушильного агента, циркулирующего по материалу. Положение точки $У$ при этом сместится вниз по линии $d = \text{const}$ в точку T в соответствии с величиной теплотеря (44). Продолжив прямую TX до пересечения с линией $W_1 = \text{const}$, получим точку K состояния газа, которое требуется для образования смеси X при практическом процессе сушки TX .

Если состояние газов, поступающих к сушильной камере, определяется точкой M , находящейся выше K , для образования смеси X из имеющихся газов T и K нужно получить смесь K , добавляя к газу M воздух A . Выявим графоаналитическим методом количество газов X , K , M и воздуха A на испарение из материала 1 кг влаги. Количество сушильного агента X , поступающего к материалу, определится по (42), кг/кг:

$$l_X = 1000 / (d_T - d_X). \quad (88)$$

Количество газов K (газообмен камеры по выхлопу), кг/кг:

$$l_K = 1000 / (d_T - d_K). \quad (89)$$

Количество газов, M , поступающих из топки, кг/кг:

$$l_M = \frac{1000 (d_K - d_A)}{(d_T - d_K)(d_M - d_A)}. \quad (90)$$

Расход тепла q на испарение из материала 1 кг влаги, кДж/кг (ккал/кг):

$$q = \frac{1000 (I_K - I_A)}{d_T - d_K}. \quad (91)$$

При эксплуатации газовых сушильных установок воздух A обычно не добавляют к продуктам сгорания. При этом точка M совпадает с точкой K . Тогда количество газа M будет приравнено к количеству газа K [см. (89) и (90)].

Процесс сушки не может быть осуществим по заданному режиму, если точка M состояния имеющихся продуктов сгорания ниже точки K . В этом случае необходимо снизить приток в систему топка — газоход — камера свежего воздуха A для повышения энтальпии подаваемого в камеру газа, по крайней мере, до значения I_K ; энтальпия газа в сушильной камере должна быть не менее I_X .

Именно по значению энтальпии газов можно давать заключение о возможности проведения заданного процесса сушки, а также о диапазоне его регулирования. Неудовлетворительный процесс горения топлива ($\alpha > 3$), а также негерметичность системы в зонах разрежения сушильной установки — главные причины низкой энтальпии сушильного агента. Для исключения подсоса воздуха в систему самих сушильных камер или турбинелей в них должно поддерживаться небольшое избыточное давление по сравнению с атмосферным.

Часто предлагают использовать для сушки пиломатериалов отходящие дымовые газы котельных. Энтальпия этих газов очень низка, недостаточна для качественной сушки пиломатериалов существующими режимами. Однако

можно использовать эту бросовую теплоту для материалов, не боящихся загрязнения сажей (слабый дым из дымовых труб — обычное, даже желательное, явление при эксплуатации промышленных котельных) и не предъявляющих режимных требований к значительной энthalпии газов.

Построение на I_d -диаграмме процессов горения топлива, а также сушки продуктами сгорания (см. рис. 20) и выявление количественных соотношений газовых потоков необходимы при проведении тепловых расчетов газовых сушильных установок, определении состава и параметров топочных газов и сушильного агента в проектируемых процессах сушки. Эти технические сведения требуются также эксплуатационникам для правильного регулирования работы топки и сушильных камер в производственных условиях.

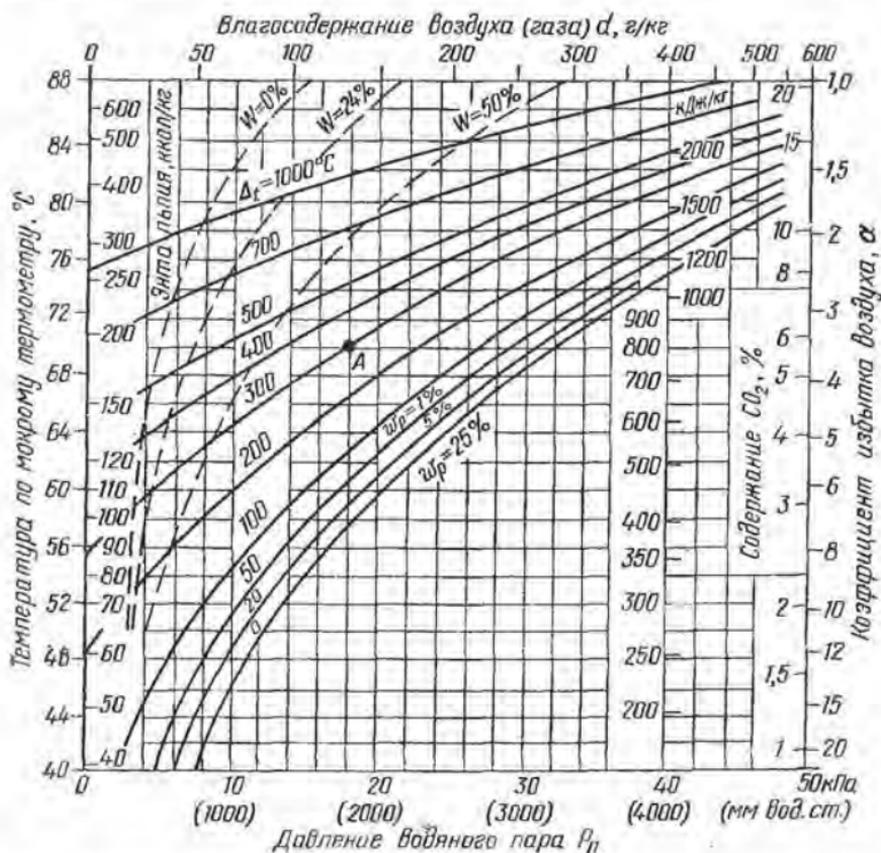


Рис. 21. Диаграмма $t_{mр}$ параметров газов и сушильного агента в зависимости от температуры по мокрому термометру t_m и психрометрической разности Δ_t

Диаграмма $t_{mр}$ (рис. 21) построена в координатах — температура по мокрому термометру до 100°С и давление пара до 10⁵ Па (1 бар). Она охватывает все возможные диапазоны сушильных параметров газа (t , Δ_t , t_m , CO_2 , I , α) и давлений пара. Шкала влагосодержаний нанесена сверху диаграммы, как и в диаграмме t_p (см. рис. 8). Справа даны значения α и CO_2 . Кривые психрометрических разностей нанесены от нуля (нижняя кривая) до

1000°С (верхняя кривая), они представляют линии постоянных потенциалов сушки.

Диаграмма $t_m p$ позволяет выявлять параметры сушильного агента при высоких температурах, в том числе параметры продуктов сгорания, например в сушильных барабанах, для частиц, когда замеренная термопарой температура на входе составляет 300—700°С, а по мокрому термометру (замеряют на выходе газа из барабана) t_m от 40 до 80°С. Процесс испарения влаги наносят по горизонтали вправо (направо от точки A) по линии $I = \text{const}$, следовательно, по t_m , CO_2 $\alpha = \text{const}$.

Пример пользования диаграммой. Замерена $t = 370^\circ\text{C}$ и $t_m = 70^\circ\text{C}$, следовательно, $\Delta t = 300^\circ\text{C}$. По горизонтали от t_m находят точку A и по ней отсчитывают параметры: $d = 135$ г/кг (вверху), $p_n = 17\,600$ Па (1800 мм вод. ст.) (внизу), точка росы $t_p = 57^\circ\text{C}$, $I = 818$ кДж/кг (справа) или 195 ккал/кг (слева, по внутренней шкале), величина CO_2 при КПД топки 0,8 равна 6% (справа), коэффициент избытка воздуха $\alpha = 3,4$ (справа).

В целях исследования режимов сушки материалов продуктами сгорания на этой диаграмме пунктиром нанесено несколько кривых относительной влажности W сжигаемого топлива, %: 0 — для древесины или мазута, 24 — для древесины или природного газа и 50 — для древесины.

Равновесную влажность ориентировочно определяют по имеющимся на этой диаграмме кривым: крайняя нижняя кривая ($\Delta t \approx 0\%$) покажет $w_p = 25\%$, вторая кривая ($\Delta t = 20^\circ\text{C}$) соответствует $w_p \approx 5\%$ и третья ($\Delta t = 50^\circ\text{C}$) — $w_p \approx 1\%$.

17. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ

Плотность и удельный объем продуктов сгорания с находящимся в нем паром при заданной температуре t и каком-либо другом известном параметре, легко определить по $I\alpha$ -диаграмме. Например, задано $t = 850^\circ\text{C}$, $d = 160$ г/кг или $p_n = 20\,700$ Па (2070 мм вод. ст.). Находят точку K (рис. 22) и по ней влажность сжигаемого древесного топлива $W = 50\%$, плотность газа $\rho = 0,299$ кг/м³ (шкала справа, вне диаграммы), удельный объем 3,93 м³/кг (шкала справа, в поле диаграммы), энтальпию 1540 кДж/кг (367 ккал/кг).

Для выявления объема нагретых газов, протекающих в газоходах (при расчете их сечения), на 1 кг сжигаемого топлива следует найти по значению I величину α (70) и по ней массу сухих газов $G_{с.г}$ (64). Умножив ее на $V_{1+0,001\alpha}$ определяют требуемый параметр.

Удельный расход топлива для получения 1 кг сухих газов определяют по (83) или (84), а также графически по шкалам вверху и внизу $I\alpha$ -диаграммы (вкладка — приложение 2). Для точки K получается $g = 0,19$ кг/кг топлива. Таким образом выявляют потребность в топливе по рассчитанному ранее (89) необходимому количеству газов.

Предельные значения параметров d , t_p и t_m будут при максимальной энтальпии газов (72), равной 3100 кДж/кг (740 ккал/кг).

Влагосодержание газов зависит от w и α (67). При $\alpha = 1$ получим

$$d = 86 + 1,57w + d_0, \quad (92)$$

а в условиях, когда $d_0=0$, будет

$$d = 86 + 1,57w. \quad (93)$$

Отсюда определяют абсциссы точек B и C , B_1 и C_1 , B_2 и C_2 (см. рис. 17) горения топлива при $\alpha=1$. Максимально возможное влагосодержание газов рассчитывают по (29). Оно равно 1130 г/кг (см. рис. 17).

Температуру точки росы в диапазоне 30—80°С с достаточной для технических расчетов точностью при $\alpha=1$ определяют (без испарения влаги из материала):

$$t_p = 39,3 \lg d - 26,8. \quad (94)$$

Из (92) и (93) получим

$$t_p = 39,3 \lg (86 + 1,57w) - 26,8. \quad (95)$$

Например, при $w=100\%$ (т. е. $W=50\%$) $t_p = 39,3 \times \lg 243 - 26,8 = 67^\circ\text{C}$, а при $w=0$ $t_p = 39,31 \lg 86 - 26,8 = 49^\circ\text{C}$.

В реальных условиях сгорания топлива, при $\alpha > 1$ определим t_p , подставляя значения α из (67) в (94):

$$t_p = 39,3 \lg \frac{92,1 + 1,678w}{0,072 + \alpha} - 26,8. \quad (96)$$

Например, при $w=100\%$ и $\alpha=3$ будем иметь $t_p=50^\circ\text{C}$. С учетом же одновременного протекания процесса испарения влаги эта величина выявится по $Id\alpha$ -диаграмме (см. приложение 2) как t_p для точки T (см. рис. 20).

Температуру по мокрому термометру (независимо от испарения влаги) в диапазоне $t_m=30 \dots 80^\circ\text{C}$ устанавливают по (73). Максимально возможное ее значение 88°С (точка B_3 на рис. 17). Для точки C_3 $t_m=85^\circ\text{C}$. Следовательно, при сушке продуктами сгорания можно выполнить все известные режимы сушки пиломатериалов, кроме сушки перегретым паром (при $t_m=-97 \dots 100^\circ\text{C}$). Температура по мокрому термометру t_m может быть также определена в виде функции разности влагосодержаний d_m-d [12]:

$$t_m = t - \frac{r_m (d_m - d)}{(1000c_B + dc_n)}, \quad (97-98)$$

где c_B и c_n — массовые теплоемкости воздуха и пара; r_m — теплота парообразования при t_m (см. табл. 1).

Измерять параметры продуктов сгорания удобно по их температуре t_g , определяемой термопарами, и влагосодержанию d_g , выявляемому с помощью влагомера газов. Влагомер состоит из хорошо теплоизолированной коробки с крышкой (рис. 23, а), труб для подачи в коробку и отвода из нее газов, резервуара для запаса воды, подаваемой к психрометру и двух его термометров, закрепляемых в крышке. По показанию психрометра при соблюдении $t > t_m$ на $Id\alpha$ -диаграмме по направлению линии MC мокрого термометра определяют состояние частично охлажденных (по $d=\text{const}$) продуктов сгорания в коробке (точка C на рис. 23, б) и, следовательно, влагосодержание газов d_g в точке Γ .

Известен ряд методов измерения температуры точки росы, следовательно, влагосодержания d , продуктов сгорания, например гигрометром

Ламбрехта, по закономерности снижения температуры турбулентного потока газа, протекающего в охлаждаемой трубе (наблюдается резкое замедление охлаждения газа ниже точки росы), и др.

Состояние продуктов сгорания на Ida -диаграмме можно легко определить по замеренным значениям их температуры и содержанию CO_2 , согласно

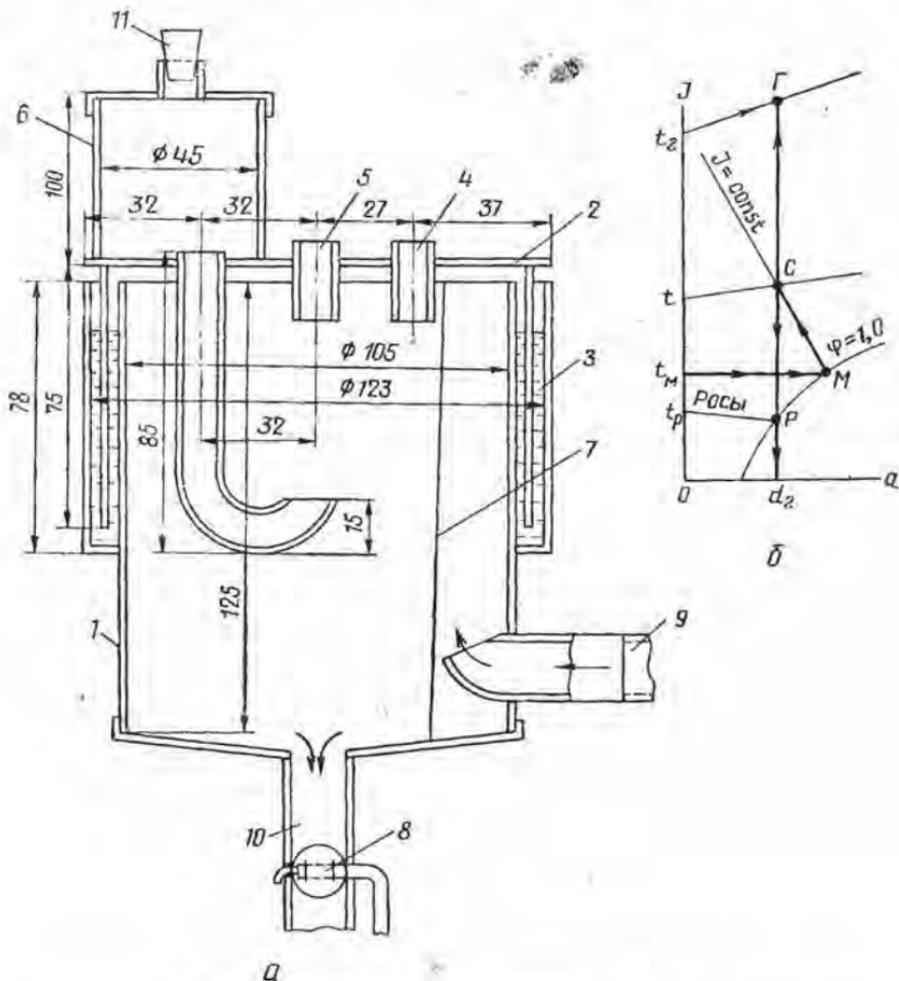


Рис. 23. Влагомер для продуктов сгорания:

a — конструкция влагомера; b — графическое нахождение влагосодержания газов; 1 — корпус влагомера; 2 — крышка; 3 — масляный затвор; 4 — втулка для установки сухого термометра; 5 — втулка для мокрого термометра; 6 — резервуар с водой; 7 — фильтр; 8 — дроссель; 9 — труба для подвода измеряемого газа; 10 — труба для отвода газа; 11 — резиновая пробка

(80) и (85); при этом определяется I . Для измерения CO_2 применяют газоанализаторы. Наиболее простой — ручной газоанализатор ГХП2. Отбираемая в мерник проба газа пропускается через раствор едкого кали (КОН), поглощающего двуокись углерода. По разности объемов проб газа до и после пропускания над раствором КОН устанавливают содержание CO_2 .

18. СУШИЛЬНЫЙ АГЕНТ ИЗ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Получение сушильного агента из продуктов сгорания в производственных условиях сопряжено с трудностями, обусловленными сложностью раздельного учета теплотерь потоком продуктов сгорания, а также подсоса к ним воздуха в условиях разрежения в сушильной установке.

Определение величины снижения энтальпии газов необходимо для выявления диапазона регулирования режимов сушки различных пиломатериалов. Перед вступлением в сушильную камеру, туннель, барабан, и т. д. продукты сгорания должны иметь по возможности высокую энтальпию (см. § 16).

Для выявления снижения энтальпии газов по их тракту в сушильной установке на I_{α} -диаграмме наносят отрезки BC (см. рис. 19, а), показывающие величину теплотерь газового потока, а также отношение отрезков CH/HA , определяющее добавку холодного воздуха к продуктам сгорания. Энтальпия газа в точке H и определит параметры X сушильного агента.

Точку B состояния газов в точке устанавливают методом, показанным на рис. 23, б. Точка H (см. рис. 19, а) находится по энтальпии требуемого (точка X) сушильного агента с известными параметрами и измеряемой температуре t_H газа H , подаваемого в сушильную камеру. Точка C находится на продолжении линии AH , которая пересекается с вертикалью, опущенной из точки B .

При работе сушильной установки без рециркуляции, например для стружки, точку K определяют по измеряемой энтальпии отработанных газов T и легко рассчитываемых теплотерь сушильного барабана, с учетом тепла на нагревание высушенной древесины. Общий процесс определится ломаной линией $TKCB$. И в этих условиях теплотери топки и газоходов выявятся по величине отрезка BC , а добавка воздуха к газам теоретического горения, когда $\alpha=1$, отношением CH/HA на 1 кг газов C (или то же B).

Нахождение точки H упрощается тем, что точка U известна (задана или замерена), а направление отрезка UH совпадет с направлением линий $CO_2=\text{const}$ и $\alpha=\text{const}$, а также $t_m=\text{const}$ и $I=\text{const}$ (уточнение см. на рис. 9, б).

19. ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ ДРУГИХ ВИДОВ ТОПЛИВА

Для сушки древесины продуктами сгорания используют в качестве топлива природный газ, мазут, дизельное топливо и иногда угли. Существенный недостаток углей и некоторых марок мазута — наличие в них серы, приводящей к образованию в продуктах сгорания сернистой кислоты и, следовательно, постепенному разрушению оборудования. Наиболее удобен природный газ. Его легко транспортировать по трубопроводам и отбирать в желательных количествах. Процесс горения этого топлива стабилен, его регулирование, в том числе автоматическое, просто, а содержание CO_2 в продуктах сгорания небольшое (около 12% при $\alpha=1$). К недостаткам природного газа как топлива относятся его токсичность и взрывоопасность (необходимо строгое соблюдение правил безопасности).

По стоимости природный газ дешевле мазута и в несколько раз дешевле углей. Следует, однако, иметь в виду, что природный газ ценное, не восстанавливаемое в природе химическое сырье, и правильность его использования лишь в качестве топлива не всегда может считаться доказанной, с учетом перспектив развития промышленности. Газы, краткие характеристики которых приведены в табл. 5, близки между собой по физическим и тепловым свойствам.

5. Характеристика некоторых природных газов и продуктов их теоретического сгорания ($\alpha=1$)

Наименование природного газа	Характеристика продуктов сгорания						
	Плотность абс. сух. газа, кг/м ³	Теплота сгорания низшая, МДж/м ³ (Мкал/м ³)	Теплота сгорания высшая, МДж/м ³ (Мкал/м ³)	Масса, кг/м ³	Энтальпия, кДж/кг (ккал/кг)	Масса водяного пара, г/м ³	Влажностное содержание, г/кг
Дашавский (УССР)	0,72	35,7 (8,52)	39,9 (9,52)	11,64	3280 (782)	1720	149
Шебелинский (УССР)	0,79	35,5 (8,47)	39,7 (9,47)	11,63	3260 (779)	1686	159
Елшанский (Саратовский)	0,76	35,9 (8,56)	40,0 (9,54)	11,72	3270 (780)	1711	146
Ставропольский	0,73	35,6 (8,49)	39,8 (9,49)	11,63	3280 (782)	1711	147
Березовский (Тюменская обл.)	0,74	35,3 (8,43)	39,5 (9,43)	11,60	3270 (780)	1700	150

Примечание. Теплота парообразования для всех природных газов около 4187 МДж/м³ (1000 Мкал/м³), а влажностное содержание продуктов сгорания — в среднем 150 г/кг; объем в кубических метрах природного газа и продуктов сгорания приведен к температуре 0°С и давлению 101 325 Па (760 мм рт. ст. — физическая атмосфера).

Для сопоставления и проведения расчетов на $Id\alpha$ -диаграмме (рис. 24) нанесены линии, характеризующие полное сгорание различных видов топлив, с ограничением максимальной энтальпии и влажностного содержания продуктов сгорания, т. е. при $\alpha=1$ (верхняя точка, обозначенная цифрой). Как видно из диаграммы, энтальпии продуктов сгорания от различных видов топлив мало различаются между собой. Несколько повышенной энтальпией характеризуются продукты сгорания, получаемые при сжигании древесины и природного газа, а пониженной — при сжигании углей.

Диаграмма показывает, что линия сжигания мазута совмещается с линией сжигания абсолютно сухой древесины, а продукты сгорания, получаемые при использовании природного газа, будут такими же, как и при сжигании древесины влажностью $W=24\%$ (т. е. $w=31\%$). Следовательно, расчетная $Id\alpha$ -диаграмма (см. приложение 2) пригодна для расчета

сушильных установок, работающих также на мазуте и природном газе, независимо от вида высушиваемой древесины (пиломатериалы, тарные дощечки, фанерный шпон, стружка для плит и т. п.), а также других материалов и продуктов. Все виды топлива, показанные линиями на рис. 24, учтены в абсолютно сухом состоянии (кроме липий 7 и 8 для древесины).

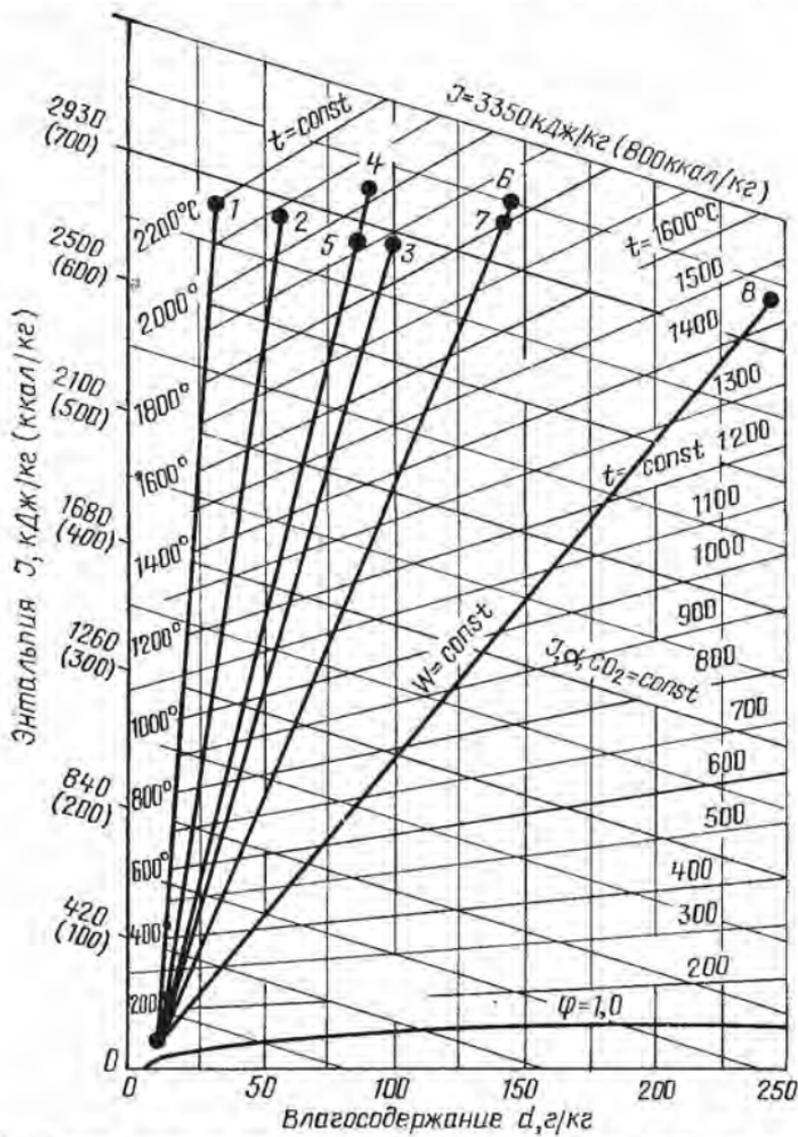


Рис. 24. Линии полного теоретического сгорания различных видов топлива на *Ida*-диаграмме:

- 1 — антрацита; 2 — каменного угля; 3 — бурого угля; 4 — абсолютно сухой древесины;
- 5 — мазута; 6 — природного газа; 7 — древесины $W=24\%$ ($w=31\%$); 8 — древесины $W=50\%$ ($w=100\%$)

Из твердых топлив наиболее близки к древесине по химическому составу и реакции горения торф, а также сухие стебли растений, солома, шелуха и др. При расчете и управлении процессом сушки на продуктах сгорания

этих топлив также может быть использована *I*da-диаграмма, составленная для сгорания древесины.

При сжигании смеси топлив, например древесной пыли с мазутом или природным газом, точку сгорания находят на рис. 24 методом интерполяции с учетом удельных количеств тепла, выделяемых компонентами смеси.

ГЛАВА 4. СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ КАК ОБЪЕКТА СУШКИ

20. СТРОЕНИЕ СТВОЛА ДЕРЕВА

Древесина имеет кольцеслоистое строение. На поверхности ствола, а также сучьев и корней, имеется одноклеточный камбиальный слой. Она неоднородна в трех главных направлениях по строению и свойствам, являясь резко выраженным анизотропным материалом. Различают направления: радиальное —

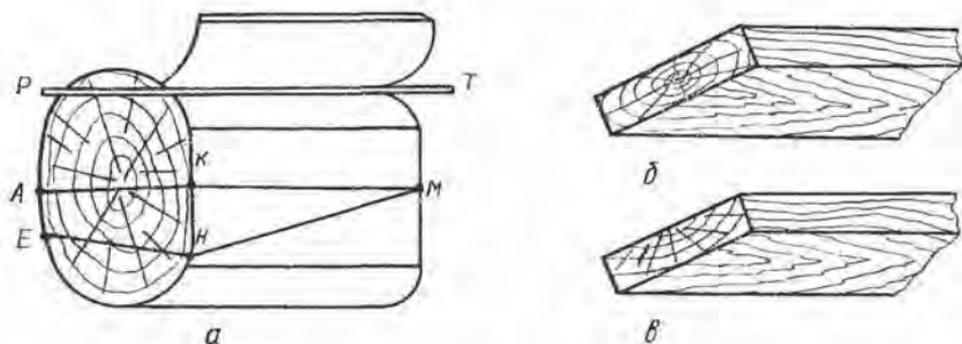


Рис. 25. Разрезы и способы выпилки досок по отношению к годовым слоям:

a — разрезы ствола дерева: *AKM* — радиальный; *HKM* — тангентальный; *AKH* — поперечный; *б* — доска радиальной выпилки — сердцевинная; *в* — доска тангентальной выпилки

по радиусу годовых слоев, тангентальное — по касательной к годовым слоям (рис. 25, *a*) и осевое — вдоль ствола. В центре внутреннего годового слоя находится сердцевина, проходящая в осевом направлении ствола, состоящая из пробковой ткани.

Соответственно этим трем главным направлениям различают разрезы или пропилы (рис. 25, *a*): радиальный *AKM*, тангентальный *HKM* и поперечный *AKH*, перпендикулярный направлению сердцевины ствола. Радиальным будет всякий плоскостной пропил или раскол, проходящий вдоль сердцевины ствола. Типичными тангентальными поверхностями древесины можно считать обе стороны лущеного шпона, срезаемого ножом *PT* по направлению годовых слоев. В соответствии с этим

выделяют пиломатериалы радиальной (рис. 25, б) и тангентальной (рис. 25, в) распиловки.

У одних древесных пород (дуб, бук и др.) при наблюдении невооруженным глазом, а у других (сосна, ель, осина, береза и др.) при рассмотрении под микроскопом видны блестящие или более темные прямые полоски, идущие прерывисто вдоль ствола в радиальной плоскости и называемые сердцевинными лучами.

Связь сердцевинных лучей с волокнами древесины слабее, чем сцепление между волокнами. Кроме того, сердцевинные лучи связывают смежные годовые слои в радиальном направлении. Поэтому при возникновении значительных напряжений древесина легче растрескивается по сердцевинным лучам, т. е. по направлению радиуса ствола, чем по какому-либо другому направлению. Именно в радиальной плоскости с внешней стороны сортимента возникают пластевые трещины при интенсивной сушке досок и брусков.

У многих древесных пород (дуб, сосна, кедр, лиственница, вяз и др.) средняя часть ствола, называемая ядром, имеет более темную окраску. Древесина ядра более плотная и прочная, труднее проводит влагу и медленнее просыхает. Периферийная часть ствола с более светлой окраской древесины называется заболонью.

У бука, а часто и у березы, ольхи и клена в средней части ствола образуется более темная древесина, называемая ложным ядром.

Иногда (например, у ели) сердцевина бывает значительно смещена по отношению к геометрическому центру ствола. При этом поздняя, т. е. более плотная древесина, в каждом годовом слое более темно окрашенная и ненормально утолщенная, образует порок, называемый кренью. Кренивая древесина, находящаяся в широкослойной части ствола, характеризуется очень большой усушкой по длине волокон, что приводит к чрезмерному продольному искривлению пиломатериалов.

Древесные волокна могут быть с наклоном по длине ствола. При сушке пиломатериалов, вырезанных из таких стволов, возникает винтообразное продольное коробление. Доски приобретают крыловатость.

Древесина состоит из групп клеток различной формы и биологического назначения, находящихся большей частью в мертвом состоянии и сохранивших лишь клеточные оболочки. Во время сплава древесины полости многих клеток заполняются водой.

Химическое строение клеточных оболочек сложно. Составными их частями являются целлюлоза (~50%), сопутствующие целлюлозе соединения — гемицеллюлозы (~25%) и аморфный по составу лигнин.

Исходный элемент клеточной оболочки — коллоидная частица — мицелла (микрофибрилла), состоящая из нитевидных целлюлозных молекул, направленных в основном вдоль ствола. Диаметр мицеллы 5—20 мкм, а длина различна. В набухших водой тканях древесины мицеллы разделены очень тонкими прослойками воды, называемой интермицеллярной, однако в самую мицеллу вода не проникает. При уменьшении прослоек воды между мицеллами целлюлоза, а вместе с нею и клеточная оболочка сокращаются, что свойственно органическим коллои-

дам. Молекулярными силами вода взаимодействует с молекулами мицелл; при этом толщина водной прослойки не может превышать предельной для ограниченно набухающего коллоида даже при заполнении водой клеточных полостей.

В физико-химическом отношении древесину можно считать ограниченно набухающим гидрофильным коллоидом.

21. ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАВНОВЕСНАЯ ВЛАЖНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ (СТАТИКА СУШКИ)

Гигроскопичность древесины

Вода может находиться в двух основных структурных элементах древесины: в полостях клеток и сосудов — *свободная* влага и в стенках клеточных оболочек — *гигроскопическая*, или связанная, влага. Различают связи: химическую, адсорбционную, капиллярную и осмотическую [14]. Наиболее прочная — химическая, наименее — осмотическая связь.

Максимальное количество связанной влаги, которое может находиться в древесине, примерно одинаково для всех древесных пород и составляет при комнатной температуре около 30% абс. Вся влага выше 30% будет свободной.

При сушке влажной древесины в первую очередь в пределах клетки полностью удаляется свободная влага и лишь затем, ниже *предела насыщения* клеточных оболочек (30%), начинает испаряться из ее оболочки связанная. По мере удаления связанной влаги расстояние между мицеллами сокращается, что приводит к усушке древесины.

При обратном процессе в начальный период влага из влажного воздуха поглощается сухой древесиной очень быстро (см. рис. 28), затем этот процесс замедляется и, наконец, прекращается.

Максимальное значение влажности древесины, при которой возможно поглощение (сорбция) ею влаги из насыщенного паром воздуха, определяет предел гигроскопического состояния древесины и может быть названо *пределом гигроскопичности*. Таким образом, предел гигроскопичности обозначает граничное значение влажности между находящейся в клетках древесины при комнатной температуре гигроскопической (до 30%) и свободной (выше 30%) влагой.

На рис. 26 схематически показано последовательное удаление свободной влаги (*а, б*) из полости, а затем связанной — из оболочки клетки. При удалении связанной влаги (рис. 26, *г, д*) толщина оболочек сокращается, однако объем полостей почти не изменяется.

При нагревании древесины предел гигроскопичности понижается. Так, если при комнатной температуре предел гигроскопичности древесины всех пород в любой части ствола около

30%, то при 60° С — около 26%, а при 90° С снизится примерно до 20%.

Размеры отдельных прослоек, или капилляров, в древесине широко варьируют, начиная от ультрамикроскопических, измеряемых долями нанометра (т. е. <1 нм, или $<1 \cdot 10^{-6}$ мм), между мицеллами и до 0,5 мм (т. е. $5 \cdot 10^2$ мкм) в крупных капиллярах. Капилляры с $r < 10^{-4}$ мм называются микрокапиллярами, а при $r > 10^{-4}$ мм — макрокапиллярами.

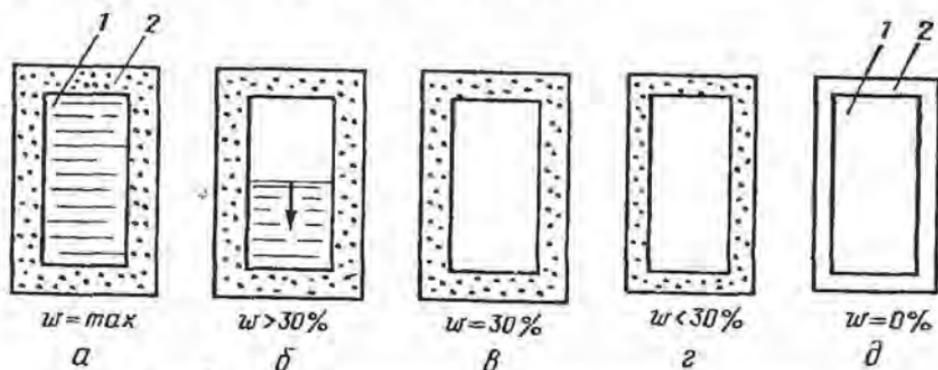


Рис. 26. Последовательное удаление влаги из клетки:

а — полость клетки заполнена влагой (свободной); *б* — часть влаги удалена из полости клетки; *в* — вся влага удалена из полости, оболочка клетки насыщена влагой; *г* — часть влаги удалена из оболочки, она частично сократилась; *д* — вся влага удалена — оболочка окончательно сократилась; 1 — полость клетки; 2 — ее оболочка; точками обозначена связанная влага

Давление водяного пара в смачиваемом жидкостью капилляре над вогнутой поверхностью мениска меньше, чем над плоской поверхностью воды. Так, при 20° С соотношение между радиусом капилляра r (мм) и относительным понижением давления водяного пара φ составит [2]:

φ	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,95	0,99	0,999
$10^6 r$	0,67	1,17	2,11	4,83	10,25	21,9	107	1077

Отсюда видно, что давление пара значительно понижается лишь в ультрамикроскопических капиллярах. Например, при радиусе капилляра $r = \frac{107}{10^6} \approx 10^{-4}$ мм $\approx 0,1$ мкм давление водяного пара уменьшится всего на 1% ($\varphi = 0,99$), т. е. практически не будет отличаться от давления пара над плоской поверхностью воды.

Температура замерзания связанной влаги от -1° С при влажности 25%, до -70° С при влажности древесины, близкой к нулю.

Из сосудов и клеточных полостей, находящихся у поверхности материала, свободная влага испаряется с такой же затратой тепла, как и с открытой водной поверхностью. Испарение связанной влаги, находящейся в клеточных оболочках, затруднено, и для ее поглощения воздух должен быть суше, а расход теплоты повышенным.

Чем ниже влажность древесины, тем прочнее связь гигроскопической межмицеллярной влаги с мицеллами и тем больше расходуется дополнительного тепла на отрыв молекул воды от вещества древесины.

На рис. 27, а показаны кривые дифференциальной теплоты набухания (шкала сверху) и полного расхода теплоты — испарения и набухания (шкала внизу) по экспериментальным данным Вейхерта для ели, бука и древесноволокнистых плит при 62,5° С, когда теплота r испарения воды составляет 2355 кДж/кг влаги (562 ккал/кг влаги) [15].



Рис. 27. Дифференциальная теплота сорбции влаги древесиной:

а — при температуре 62,5° С, по опытным данным Вейхерта для древесины: 1 — ели, 2 — бука, 3 — древесноволокнистых плит; б — при температуре 50° С, по опытным данным Стамма для сосны.

На рис. 27, б приведена полученная Стаммом опытным путем кривая дифференциальной теплоты набухания dQ/dw древесины в зависимости от ее влажности при 50° С. Кривая имеет вид логарифмики. При уменьшении влажности древесины и приближении ее к нулю дифференциальная теплота набухания равна примерно 1260 кДж (300 ккал) на 1 кг испаряемой влаги, т. е. превышает половину величины теплоты испарения свободной воды. Можно предложить уравнение этой кривой в виде

$$\frac{dQ}{dw} = e^{7,06 - 0,318w} \text{ кДж/кг} \quad (e^{5,63 - 0,254w} \text{ ккал/кг}). \quad (99)$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Равновесная влажность древесины

Если взять отдельно пробы очень влажной и сухой древесной стружки и положить их в неотапливаемом помещении, периодическим взвешиванием можно установить, что влажная

стружка просыхает, а сухая — слегка увлажняется, поглощая влагу из воздуха. С течением времени обе пробы приобретут примерно одинаковую влажность (рис. 28, а). С изменением погоды изменяется влажность стружки. В насыщенном паром воздухе ($\varphi=1$) влажность стружки достигнет примерно 30%, т. е. будет соответствовать пределу гигроскопичности древесины. Если провести опыт в более сухом воздухе, например в комнатных условиях, с пробами древесины меньшей, но разной влажности, будут получены аналогичные кривые (рис. 28, б); проба 4 — крупных размеров (медленное выравнивание влажности).

Таким образом, определенному состоянию воздуха соответствует уравновешенная с ним влажность и температура древесины, называемая *равновесной*. Указанное состояние равновесия существует между тремя параметрами: $\omega_p(\varphi, t)$. Как в уравнении (3), φ и здесь показывает состояние пара. Абсолютно сухая часть воздуха

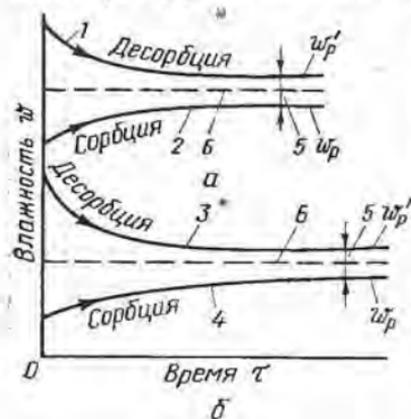


Рис. 28. Кривые выравнивания влажности древесины во времени:

а — во влажном воздухе; б — в сухом воздухе; 1 — проба с высокой начальной влажностью; 2, 3 — пробы с повышенной начальной влажностью; 4 — проба с низкой начальной влажностью; 5 — гистерезис сорбции; 6 — равновесная влажность древесины (пунктиром)

может иметь любое давление, или совсем отсутствовать, или даже заменяться другим газом, химически не взаимодействующим с древесиной; состояние равновесия пара с древесиной от этого не изменится. Параметр t показывает температуру древесины и одновременно одинаковую с нею температуру окружающего ее пара.

Значение ω_p будет больше, если древесина имела повышенную влажность и высушивалась. Если перед достижением равновесного состояния влажность древесины повышалась, т. е. происходила сорбция влаги, значение ω_p будет несколько меньше. Таким образом, горизонталь ω'_p десорбции будет выше горизонтали ω_p (см. рис. 28), полученной в результате сорбции. Разница между $\omega'_p - \omega_p$ называется *гистерезисом сорбции*. Она указывает на неполную обратимость процессов сушки и увлажнения древесины. Вследствие небольшой разности $\omega_p - \omega_p$ практически учитывают только кривые сорбции (ω_p) или промежуточное значение (пунктир на рис. 28). Величина гистерезиса сорбции — десорбции зависит от толщины материала и температуры: она снижается для более тонкого материала

ла и с повышением t ; более точным будет параметр «градиент гистерезиса сорбции».

Соотношение $w_p(t, \varphi)$ выявляется экспериментально длительной выдержкой измельченной древесины в эксикаторах над серной кислотой, которая создает соответствующую степень насыщенности пара φ ; эксикаторы выдерживают в термостабах. Эта зависимость, обработанная автором по опытным данным Н. Н. Чулицкого, для древесины сосны, ясеня и дуба представлена графически на рис. 29. Для удобства отсчета величин равновесной влажности w_p непосредственно по показаниям психрометра на диаграмме нанесены кривые одинаковых значений психрометрических разностей Δt .

Изотермы сорбции разных материалов можно описывать уравнением гипербол [2];

$$w_p = a\varphi / (b - \varphi). \quad (100)$$

Для древесины дано уравнение логарифмики [2], предложена степенная зависимость. Однако эти уравнения неточны (ошибка более 3%) и применимы лишь для части диапазона φ .

Уравнение В. Я. Каплана, выведенное из соотношения Томсона, имеет вид

$$w_p = (3,6 - 0,015t) e^{2,1\varphi}. \quad (101)$$

Более точными (отклонения от опытных данных менее 0,5% влажности древесины) и универсальными, с охватом всего диапазона φ , причем одновременно пригодными для всех изотерм, являются следующие уравнения:

1. Для диапазона $\varphi = 0 \dots 0,5$, когда древесина содержит адсорбированную и микрокапиллярную влагу, получено уравнение семейства прямых изотерм, %:

$$w_p' = w_0 + 0,72\varphi [29,5 - (T/100)^2]. \quad (102)$$

При этом величина w_0 (%), откладываемая по вертикали на начальном участке оси абсцисс, равна

$$w_0 = 0,36 [13,9 - (T/100)^2], \quad (103)$$

где T — абсолютная температура.

2. Для значений φ в диапазоне 0,5—1,0, когда древесина содержит также капиллярную влагу, наиболее близко уравнение семейства гипербол, %:

$$w_p'' = \frac{0,512}{1,21 - \varphi} [21,7 - (T/100)^2]. \quad (104)$$

По уравнениям (102)—(104) построена $w_p t$ — диаграмма (см. рис. 29), показывающая закономерную зависимость между ее параметрами. В правой части диаграммы между двумя изотермами 100°С выявляется область неустойчивого состояния

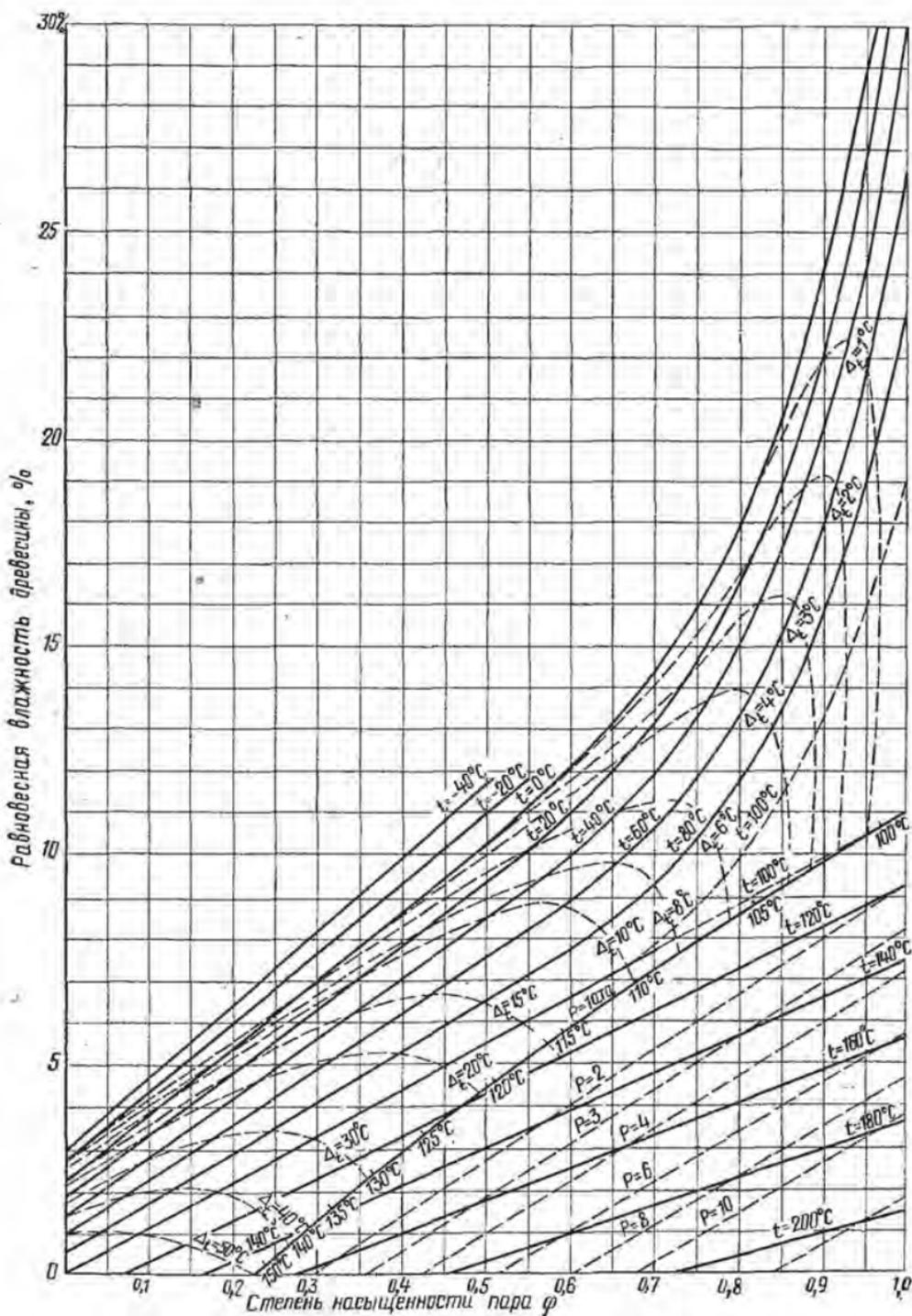


Рис. 29. Исходная диаграмма равновесной влажности древесины в координатах $w_{p\phi}$

влажности древесины. В нижней правой части диаграммы показана область перегретого пара с температурами выше 100°C и давлениями больше атмосферного при соответствующей его степени насыщенности φ . Учитывая возможные изменения состояния древесины в этих условиях, особенно при длительной ее выдержке, эту область (при $t > 80^{\circ}\text{C}$ и $\varphi > 0,7$) следует считать вспомогательной. Она наглядна для анализа процессов обработки древесины в аналогичных условиях и характеризует мгновенную ω_p .

Приобретение кривыми противоположной кривизны у начала координат обозначало бы снижение энергии связи влаги с древесиной по мере уменьшения ее влажности, что лишено основания. Однако в технической литературе встречаются $\omega_p\varphi t$ -диаграммы с обратной кривизной изотерм сорбции у начала координат и направлением всех изотерм в нулевую точку диаграммы. Последнее показывало бы, что древесина высыхает до $\omega_p = 0\%$ в эксикаторе при комнатной температуре, но это не подтверждается опытом.

Равновесная влажность древесины снижается при температурном на нее воздействии (выше $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$), особенно длительном, показывая термическую деструкцию древесины. В небольшой мере ω_p будет ниже, если древесина смолистая и очень плотная.

Пропитка раствором сахара с последующим нагреванием (для его карамелизации) снижает равновесную влажность древесины примерно в 2 раза. Тот же эффект может быть получен при пропитке древесины березы диффузионным способом $0,5\%$ -ным раствором хлористого алюминия. С другой стороны, пропитка древесины солями, в частности NaCl или мочевиной $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, повышает ее равновесную влажность; бочки, пропитавшиеся соляными растворами, почти всегда «мокрые» снаружи.

Для замедления скорости поглощения влаги высушенную и обработанную древесину часто покрывают влагоизолирующими веществами. Такие покрытия защищают ее поверхность от резких изменений состояния пара в окружающем воздухе, улучшают условия службы древесины, предохраняют ее от растрескивания и т. д. Однако при любых покрытиях не предотвращается влагообмен древесины с окружающей средой (кроме глухих покрытий металлическими листами), удлиняется лишь время для достижения состояния равновесия.

Диаграммы равновесной влажности древесины

Диаграмма, показанная на рис. 29,—исходная, основная при изучении статике сушки древесины. Такие диаграммы строят и исследуют для различных веществ и продуктов в целях раскрытия их гигроскопических и технологических свойств.

Применительно к производственным условиям, а также проектным и лабораторным работам желательно составить видоизмененные диаграммы, более наглядные в практике.

На рис. 30 приведена диаграмма $\omega_p(\varphi t)$, на которой в координатах $t\varphi$ линии равновесной влажности древесины ω_p близки к прямым. На диаграмме нанесены также пунктирные кривые психрометрической разности Δt для более удобного практического применения.

На рис. 31 воспроизведена в малом масштабе рассмотренная ранее Id -диаграмма воздуха; на ней дополнительно нанесены

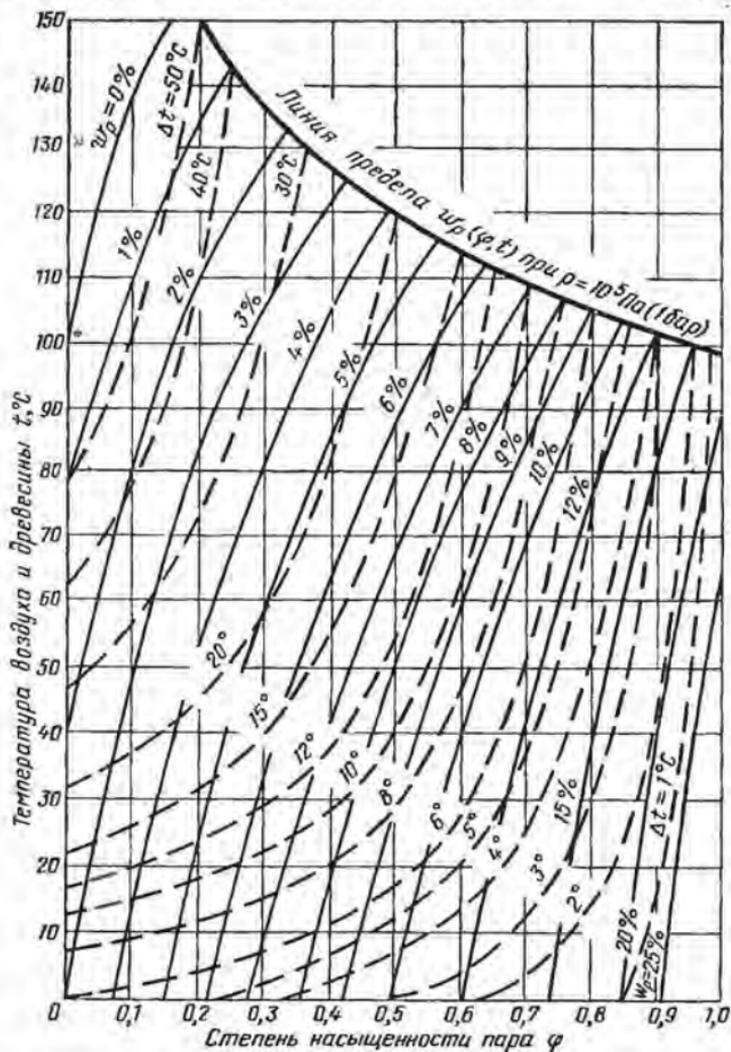


Рис. 30. Диаграмма равновесной влажности древесины в координатах $t\varphi$ линии равновесной влажности древесины. Расширенная таким образом диаграмма отражает свойства воздуха как сушильного агента и основное свойство древесины (ω_p) как объекта сушки. Она удобна в проектной и исследовательской работе.

Давление водяного пара P_n , кПа (мм вод. ст.)

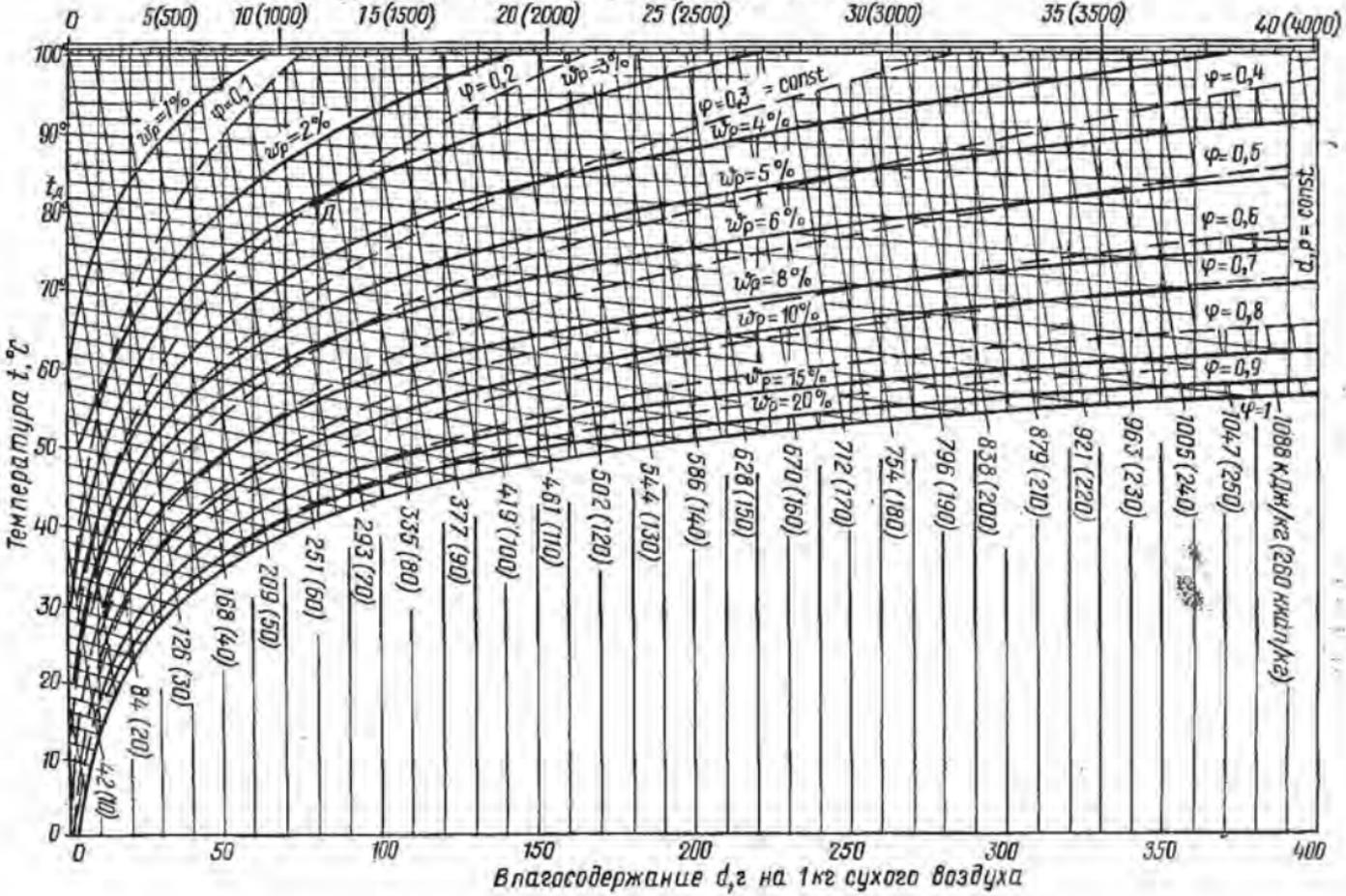


Рис. 31. Id -Диаграмма, дополненная линиями равновесной влажности древесины

Перегретый пар давлением выше атмосферного характеризуется параметрами φ (3), так же как пар давлением ниже атмосферного. Поэтому можно нанести линии равновесной влажности древесины на энтропийной iS -диаграмме [10], а также на термодинамической диаграмме TS . iS -диаграммой рекомендуется пользоваться при сушке древесины перегретым паром.

Наиболее прост отсчет ω_p непосредственно по t и t_m , психрометра, однако точность определения ω_p при этом невысока. Более точным следует признать определение ω_p по двум исходным и основным параметрам сушильного агента — температуре и психрометрической разности, которую надо выявлять с повышенной точностью, поскольку она — главный параметр, влияющий на величину ω_p . Установление каждый раз дополнительного параметра φ при этом будет излишним.

Такая рабочая диаграмма для сушильных производств к повседневному использованию представлена на рис. 32. Изотермы на ней горизонтальные. Линии ω_p — дугообразные, с максимальными их значениями при $t=40 \dots 90^\circ \text{C}$. Для ориентировки о состоянии среды на диаграмме показаны линии $\varphi=\text{const}$ и $d=\text{const}$. Верхняя (жирная) линия $d=\text{const}$, идущая от ординаты 100°C наклонно вверх, характеризует чистый пар атмосферного давления с разной степенью его перегрева $\Delta_t=t-100^\circ \text{C}$, показанной на оси абсцисс, когда $d=\infty$. В любой точке диаграммы температура по мокрому термометру равна разности численных значений ординаты и абсциссы. Например, для точки A с координатами $t=60^\circ \text{C}$ и $\Delta_t=10^\circ \text{C}$ (т. е. $t_m=50^\circ \text{C}$) находим $\omega_p=9\%$; кроме того, определяем $\varphi=0,6$.

Жирная линия сверху на рис. 32 показывает температуру кипения свободной влаги в древесине при $t_m=100^\circ \text{C}$, а также определяет значения ω_p и φ при температуре $t>100^\circ \text{C}$ перегретого пара атмосферного давления, как сушильного агента. Выше этой линии давление пара более 0,1 МПа (1 бар).

Для обычных в лесосушильных установках температур $50-80^\circ \text{C}$, при которых участки кривых ω_p (см. рис. 32) близки к вертикалям, равновесную влажность древесины приближенно можно считать функцией лишь Δ_t . При этом зависимость $\omega_p(\Delta_t)$ опишется простым соотношением

$$\omega_p = 115/(\Delta_t + 4). \quad (105)$$

Например, при $\Delta_t=6^\circ \text{C}$ получим $\omega_p=11,5\%$, при $\Delta_t=20^\circ \text{C}$ $\omega_p=4,8\%$, что близко к результатам, найденным по диаграмме (см. рис. 32).

При сушке перегретым паром барометрического давления, когда в камеру обычно проникает небольшое количество воздуха, для выявления ω_p используется (см. рис. 32) полоса значений t и Δ_t между жирной наклонной линией $d=\infty$ и пунк-

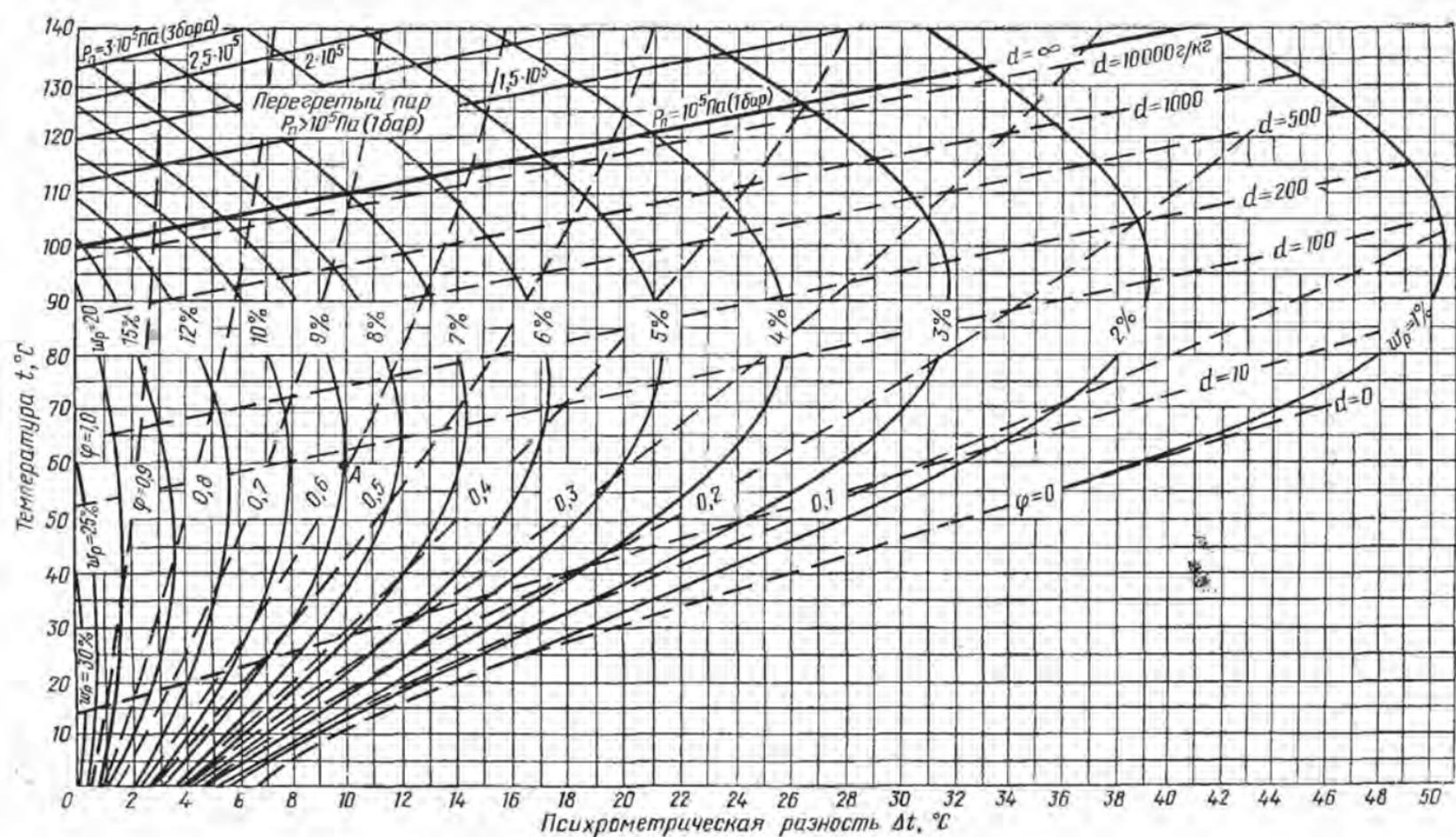


Рис. 32. Диаграмма равновесной влажности древесины в координатах $t/\Delta t$

тирной $d=10\ 000$ г/кг. При этом масса пара в сушильном агенте будет примерно в 10 раз больше массы воздуха; в этом случае $t_M > 97^\circ\text{C}$.

Ввиду большого значения рассматриваемого параметра ω_p при различных t , Δt , φ для ведения процесса сушки, его анализа, разработки оптимальных режимов сушки и автоматизации процесса на рис. 33, в координатах $t\omega_p$ приводится диаграмма $\omega_p(\Delta t, \varphi)$ производственного назначения. Положение точки А

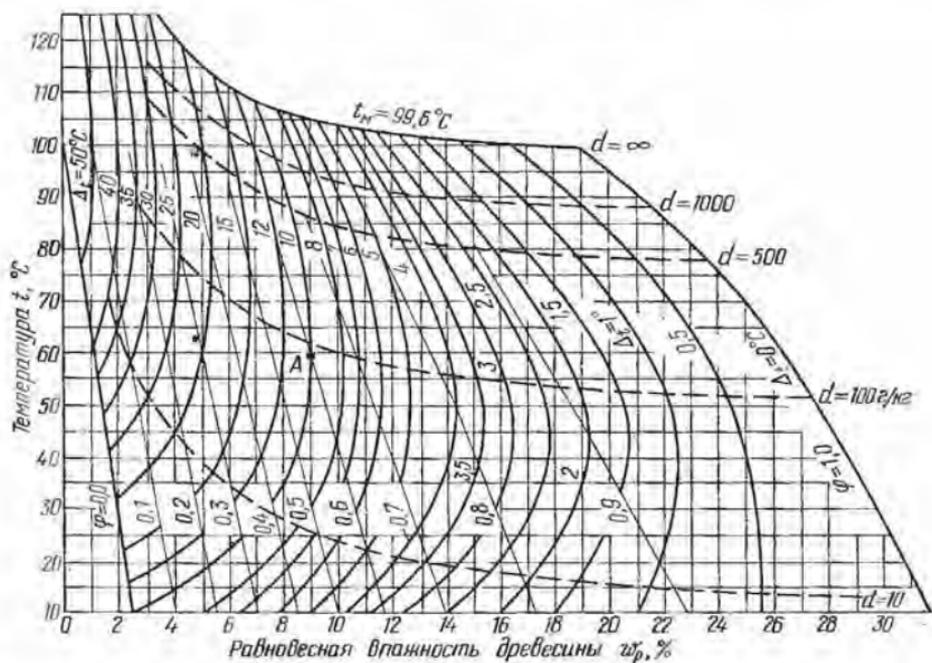


Рис. 33. Диаграмма равновесной влажности древесины в координатах $t\omega_p$

соответствует ее координатам на рис. 32. На диаграмме рис. 33 удобно отсчитывать ω_p (внизу диаграммы) и обстоятельно анализировать изменения состояния воздуха при постоянных ω_p (вертикали). Как и на рис. 32, для обычных режимов сушки досок зона d от 100 до 500 г/кг.

22. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ

До сушки влажность древесины неодинакова. У сплавной древесины она выше (у бревен, находившихся под уровнем воды), чем у древесины сухопутной доставки. У растущего дерева влажность изменяется в зависимости от породы, условий произрастания и зон дерева. Приводимые в технической литературе сведения о влажности древесины представляют собой или

усредненные ее значения, или результаты отдельных замеров.

У хвойных и ядровых лиственных пород, а также у бука влажность в периферийной зоне выше (100—140%), чем в центральной части ствола (35—40%). У березы, осины и липы влажность древесины по всему сечению ствола отклоняется незначительно (в центральной части на 20—30% больше) и составляет 80—120%. С возрастом дерева влажность понижается. Как правило, у разных пород плотная древесина менее влажная, чем легкая. В среднем влажность древесных хвойных пород 90%, мягких лиственных 80 и твердых лиственных 65%.

При хранении в летнее время бревен на складе влажность древесины заметно понижается. Так, у сплавленных бревен за несколько летних месяцев она снижается со 150—70 до 110—50%. Можно считать, что у тонких досок (до 35 мм) хвойных пород, выпиленных обычно из боковой части сплавленных бревен, начальная влажность в среднем 80—90%, у толстых 60—80%, а у древесины хвойных пород сухопутной доставки примерно на 10% меньше.

О большом разбеге начальной влажности досок толщиной 40 мм, выпиленных из сплавленной древесины на Соликамском комбинате в конце осени, можно судить по кривой рис. 34, а. Влажность части сосновой древесины, находившейся на верху плота, понизилась до 20%, в то время как влажность других досок была выше 150%. Средняя влажность этой партии досок 53%; наибольшее количество досок оказалось влажностью 40%; среднеквадратическое отклонение $\sigma = \pm 27\%$.

На рис. 34, б показана влажность тех же досок после высушивания в семиштабельном туннеле с зигзагообразной циркуляцией воздуха в течение 140 ч. При этом получена средняя конечная влажность древесины 9,1%; среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,43\%$. Кривая распределения конечной влажности древесины характеризуется необычайной асимметрией и малой величиной σ .

По своему физическому состоянию различается древесина: 1) сырая — с более высокой влажностью, чем в свежесрубленном состоянии; 2) влажная — в свежесрубленном состоянии; 3) подсушенная — продолжающая высушаться в атмосферных условиях; 4) атмосферно-сухая — долгое время находившаяся на открытом воздухе под крышей, когда влажность древесины в северной и средней частях СССР снизилась до 20—15%, а в южных — до 15—12%; 5) комнатно-сухая, с влажностью 8—6%; 6) абсолютно сухая, выдержанная в сушильном шкафу до постоянной массы, т. е. до прекращения потери влаги, при 101—105° С.

В зависимости от назначения древесины различают следующие ее состояния по влажности: 1) влажная — не подвергавшаяся сушке; 2) транспортно-сухая — с влажностью не выше 22%, при которой плотно уложенные пиломатериалы можно

перевозить в летнее время без опасения поражения их грибами; 3) эксплуатационно-сухая, когда влажность древесины соответствует требуемой в условиях ее эксплуатации; 4) технически сухая, когда ее влажность соответствует норме технических условий на сушку материала для данного его назначения (например, для стройдеталей 10—12%, для мебели 6—8% и т. д.). Эта влажность не всегда соответствует эксплуатационной — древесину несколько пересушивают.

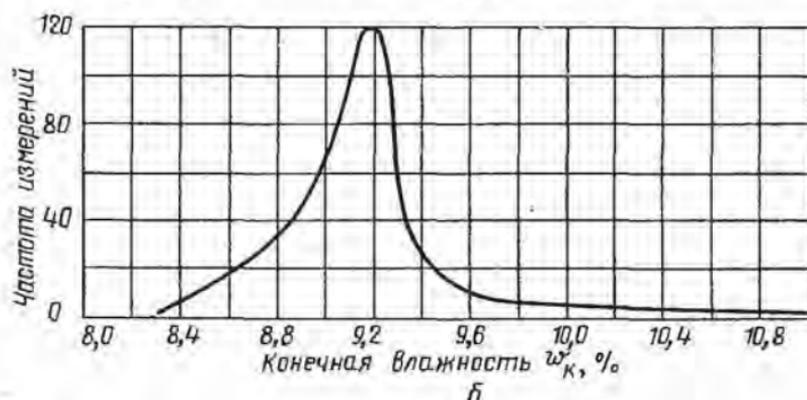
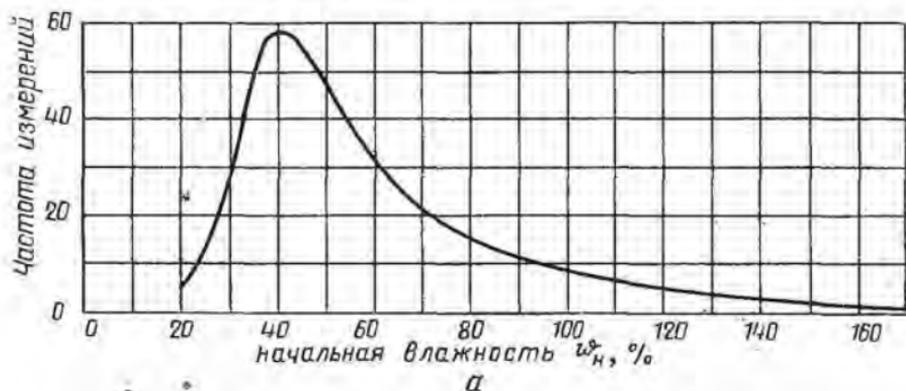


Рис. 34. Отклонения влажности древесины в различных сосновых досках толщиной 40 мм от средней влажности:

а — до сушки; б — после тувельной сушки

23. УПРУГО-ВЯЗКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ, ПРОЯВЛЯЮЩИЕСЯ ПРИ СУШКЕ

Древесина, как природный полимер, обладает упруго-вязкими свойствами: в нагретом влажном состоянии она легко деформируется как упруго-вязкое тело, а в сухом состоянии в большей мере — как упругое.

Характерная особенность пиломатериалов при их высушивании — возникновение в них деформаций и напряжений. Деформации проявляются в поперечном к длине волокон направ-

лении. Деформации по сечению материала возникают без приложения внешних сил, поэтому могут быть названы внутренними.

Различаются обратимые *упругие* деформации древесины, включающие при длительной сушке деформацию упругого последствия (называемые иногда упруго-эластическими), и необратимые, *остаточные* с одновременным протеканием их во времени в поперечном сечении высушиваемого сортамента.

Проявление реологических свойств древесины во время сушки может быть представлено следующим опытом, наглядно отражающим закономерность всего сушильного процесса. Если отрезать небольшой кусок сырой доски (1—2 см по длине волокон), расколоть его продольно на два слоя (рис. 35, а), а затем, закрепив попарно их концы и нагрев древесину, медленно, в несколько приемов, расклинить посередине (рис. 35, б), слои в результате приложения сил изогнутся, т. е. в них возникнут деформации и напряжения, снаружи растягивающие (знак +), внутри сжимающие (знак -). При больших растягивающих деформациях снаружи в слоях могут появиться трещины (рис. 35, в). Однако в этом опыте древесину не доводят до разрушения. Подсушенные напряженные слои останутся изогнутыми даже после того, как усилия будут устранены (рис. 35, г). Несмотря на изгиб, в древесине не окажется упругих деформаций и, следовательно, не будет напряжений. Если затем оба изогнутых слоя продольно разрезать на пластинки и выровнять их с одного конца, пластинки окажутся разной длины: в середине короче, а по краям длиннее (рис. 35, д), хотя влажность их будет одинаковой. Объясняется это тем, что снаружи слоев действовали растягивающие упругие напряжения и деформации (см. рис. 35, б), создававшие давление на клин, превратившиеся в необратимые, остаточные, растянув наружную их зону. Во внутренней зоне проявлялись сжимающие упругие деформации, которые тоже перешли в необратимые, остаточные, сократив размер древесины (независимо от усушки, дополнительно к ней).

Отсюда следует, что под воздействием упругих деформаций древесина, как упруго-вязкое тело, может остаточнo растягиваться или упрессовываться, особенно во влажном и нагретом состоянии. При этом упругая деформация самопроизвольно переходит в остаточную, фиксируя новый размер тела. Такова реологическая характеристика первой стадии сушки, когда возникает опасность появления в пиломатериалах наружных трещин.

Если, не разрезая обоих изогнутых слоев на пластинки, попытаться выпрямить их (рис. 35, е), в наружной зоне появятся сжимающие, а во внутренней — растягивающие упругие деформации. В случае приложения значительных усилий растягивающие упругие деформации во внутренней зоне слоев могут

привести к внутренним трещинам (рис. 35, ж). Если сжимать постепенно, а древесину предварительно увлажнить и нагреть, внутренние трещины не появятся и высушенные зажатые в плоском состоянии слои постепенно станут прямыми (рис. 35, з). Разрезав их на пластинки (рис. 35, и), можно установить, что длина всех пластинок одинакова, как и в начале опыта. Это значит, что во внутренней зоне слоев возникла остаточная деформация растяжения, а в наружной — сжатия, т. е. произошло явление, противоположное ранее наблюдавшемуся (см. рис. 35, д). В этом схематически заключается реологическая характеристика второй стадии сушки, когда существует опасность возникновения в толстых пиломатериалах внутренних трещин, напоминающих раковины в металллите.

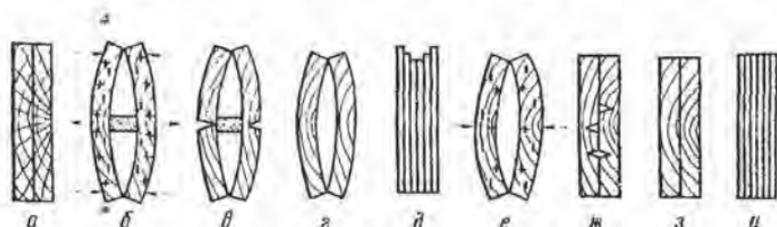


Рис. 35. Схемы упруго-вязких деформаций древесины во время сушки

Возникшие при расклинивании слоев растягивающие упругие деформации снаружи и сжимающие во внутренней зоне по мере накопления остаточных деформаций растяжения и сжатия древесины (см. рис. 35, б) постепенно спадают, происходит их релаксация. Они становятся в конце подсушки настолько малы, что слои будут слабо нажимать на клин, и он может выпасть (см. рис. 35, г). Такое же постепенное уменьшение (релаксация) растягивающих упругих деформаций во внутренней зоне слоев и сжимающих в наружной происходит и после их выпрямления и досушки древесины (см. рис. 35, е).

Сущность релаксации именно в переходе упругих деформаций в остаточные. Релаксация упругих деформаций (следовательно, напряжений в древесине) проявляется во многих случаях ее применения в напряженном состоянии. Например, гвозди, забитые во влажную древесину, со временем, особенно если древесина просохла, выдергиваются в 3—4 раза легче, чем сразу после забивки. Сила же, необходимая для выдергивания гвоздей, забитых в сухую древесину, остается почти постоянной во времени. Этим также объясняется, что медленное гнутье древесины, в частности поперек волокон, приводит к меньшему излому (происходит частичная релаксация напряжений во времени), чем быстрое гнутье. Релаксация протекает сначала по круто нисходящей (экспоненциальной) кривой, затем приближающейся к своей горизонтальной асимптоте.

За единицу времени релаксации принимается период, в течение которого величина начальных напряжений уменьшается в $e=2,72$ раза. Это время τ определяется по формуле

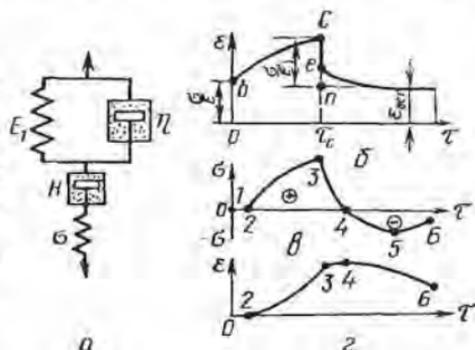
$$\tau = \eta / (E_1 + H) = Ae^{-\frac{U}{kT}}, \quad (106)$$

где η — коэффициент вязкости тела; H — мгновенный модуль упругости в направлении нагрузки; E_1 — дополнительная упругая связь; k — постоянная Больцмана; U — энергия активации релаксационного процесса; T — абсолютная температура; A — коэффициент.

Реологическая модель и закономерности упруго-вязкого $\eta E_1 H$ деформирования изображены на рис. 36, а. На рис. 36, б

Рис. 36. Реологические схемы деформирования древесины:

а — принципиальная схема модели; б — эпюра деформаций; E_1 — упругие (Гуково тело); η — вязкие — неплотный поршень с вязкой жидкостью (Ньютоново тело); H — упруго-вязкие деформации (Максвеллово тело); в — развитие упругих деформаций в поверхностной зоне материала при сушке; г — развитие остаточных деформаций



показан график bC развития деформаций ε при постоянной нагрузке σ во времени τ . В точке C нагрузка мгновенно сброшена, отрезок Ce показывает упругую деформацию, en — деформацию упругого последействия, эластическую (ввиду длительного процесса сушки ее можно отдельно не рассматривать). С учетом этих параметров справедливо следующее уравнение зависимости ε (σ , E , H , τ) [16]:

$$\varepsilon (\tau H + E) = \sigma (\tau + 1), \quad (107)$$

где ε — относительная деформация; E — модуль упругости в направлении нагрузки.

Отсюда, величина напряжений σ будет

$$\sigma = \frac{\varepsilon (\tau H + E)}{\tau + 1}. \quad (108)$$

Если τ близко к нулю (в начале деформирования), $\sigma \approx \varepsilon E$, имеется в основном упругая деформация, материал может трескаться (см. рис. 35, б, в). Затем неравномерно по толщине материала (из-за наличия градиента влажности) нарастают и развиваются остаточные деформации, внутри материала во второй стадии сушки могут возникнуть раковины (см. рис. 35, ж).

Для реального процесса сушки схема развития упругих деформаций (напряжений) в поверхностной зоне материала показана на рис. 36, *в*. В начале сушки возникает растяжение (+) материала с опасностью наружного его растрескивания, а во второй стадии сжатие (-) поверхности, следовательно, растяжение в центральной зоне и создается опасность внутреннего растрескивания (раковин). Точки 1—6 показывают последовательность развития напряжений в процессе сушки: 1—2 — отсутствие напряжений, 2—3 — их нарастание, 3—4 — спадание их до нуля, 4—5 — нарастание сжимающих напряжений и 5—6 — их постепенное спадание (релаксация).

Из рассмотренных закономерностей следуют существенные выводы для теоретических анализов и методик построения рациональных процессов сушки древесины: в начале первой стадии сушки, когда возникает опасность торцового растрескивания пиломатериалов, определяющим реологическим параметром процесса является модуль упругости E ; затем, в первой стадии сушки, воздействует суммарный параметр $E+H$ с возрастающим влиянием H , а во второй стадии сушки в процессе участвуют в основном остаточные деформации (влияние H).

В поверхностной зоне материала напряжения будут положительными в первой и отрицательными во второй стадии сушки (рис. 36, *в*), а остаточные деформации — только положительные. Они нарастают в первой и уменьшаются во второй стадии сушки (рис. 36, *г*); точка 4 — их максимум (соответствует нулевым напряжениям на рис. 36, *в*).

Кривая на рис. 36, *г* получена в результате интегрирования кривой на рис. 36, *в*. Участок 2—3 на рис. 36, *г* (вогнутый) показывает быстрое увеличение остаточных деформаций к концу первой стадии, а участок 4—6 (выпуклый) — медленное спадание этих деформаций в начале второй стадии сушки (от точки 4). Таким образом, остаточные деформации порождаются упругими и следуют за ними по скорости нарастания. Их конечная величина зависит от продолжительности действия и величины упругих деформаций.

Зависимость поперечных предельных упругих деформаций в тангентальном направлении от влажности w и температуры t в условиях сушки при их одновременном влиянии выражается для древесины сосны следующим уравнением [17]:

$$\epsilon = (-0,24w^2 + 15,6w + 60) 10^{-3}t^{0,5}. \quad (109)$$

Функция предельных остаточных деформаций ϵ от влажности w и температуры t древесины при скорости нагружения 0,2 МПа в минуту получена в виде

$$\epsilon_{ост} = (-1,95w^2 + 200w + 233,6) 10^{-5}t^{0,7}. \quad (110)$$

При замедлении скорости нагружения $\epsilon_{ост}$ возрастает.

Зависимость мгновенного модуля упругости древесины от ее влажности обратная. Она близка к линейной. Сильно выражена обратная зависимость мгновенного модуля упругости от температуры t . С повышением температуры и влажности древесины упругие деформации уменьшаются быстрее, переходя в остаточные как в закрепленном на концах стержне, так и в сечении пиломатериалов, в которых упругие деформации возникли в процессе сушки (см. рис. 35, ж, з).

Свойства древесины как упруго-вязкого тела необходимо знать потому, что один из основных дефектов сушки — внутренние трещины (раковины) — может быть объяснен только образованием и накоплением остаточных деформаций в нагретой влажной древесине. По этой причине наружные трещины в начале сушки часто не возникают даже при большом перепаде влажности по толщине сортимента. Кроме того, вследствие проявления остаточных деформаций изменяется величина усушки и предотвращается коробление правильно уложенного (закрепленного между прокладками) материала. Это важное свойство древесины должно быть правильно использовано в целях более качественного ее высушивания.

При рассмотрении процессов сушки древесины удобнее анализировать упругие деформации (а не напряжения) поскольку: а) остаточные напряжения не реальны; б) во многих случаях отпадает необходимость в определении модулей упругости (достаточно измерить предельные деформации); в) более доступным для анализа становится явление релаксации — перехода упругих деформаций в остаточные при постоянной их суммарной величине.

24. ЗАКОНОМЕРНОСТИ УСУШКИ И УСАДКИ ДРЕВЕСИНЫ

При уменьшении содержания в древесине связанной влаги, т. е. при влажности ниже 30%, водная прослойка между мицеллами сокращается и древесина усыхает. При изменении в древесине количества свободной влаги (выше 30%) размеры клеток древесины сохраняются неизменными. Таким образом, *предел гигроскопичности (30%) — это одновременно предел усушки древесины.*

Усушка и обратный процесс — набухание — неотъемлемые свойства природной древесины как ограниченно набухающего коллоида и характерные ее недостатки как материала. Если искусственными приемами (нагревом, пропиткой смолами, сахаром и т. д.) снизить гигроскопичность древесины, уменьшится ее усушка. Решение этой задачи актуально для промышленности и относится к научным проблемам крупного технико-экономического значения.

В связи с анизотропностью строения усушка древесины неодинакова в различных направлениях: по длине волокон она

наименьшая (около 0,1% при удалении из древесины всей влаги); только креновой древесине свойственна большая продольная усушка (до 5%); по направлению годовых слоев, т. е. в тангентальном направлении, усушка наибольшая, 8—12% [18]. Усушка по радиусу ствола 4,5—8%, т. е. почти в 2 раза меньше, чем по направлению годовых слоев. Древесина заболони усыхает несколько больше древесины ядра.

Усушка по торцовой площади, а также по объему сортамента примерно равна сумме усушек по радиальному и тангентальному направлениям. Например, если усушка по тангентальному направлению 10%, а по радиальному 6%, древесина сохнет как в поперечном сечении, так и по объему примерно на 16%, независимо от формы кусков.

Величина усушки древесины по объему примерно соответствует объему испарившейся из древесины связанной влаги. Так как древесина более плотных пород содержит в единице объема больше связанной влаги, она больше и усыхает. Следовательно, древесина дуба, клена, граба и т. д. характеризуется большей усушкой, чем древесина пихты, тополя, ольхи. Как исключение из этого правила, усушка древесины осины и липы примерно соответствует усушке дуба. Для древесины липы характерна, кроме того, небольшая разница в величине радиальной и тангентальной усушек, вследствие чего эту древесину предпочитают при изготовлении ответственных деталей, например в модельном производстве. Наоборот, у древесины кедра и пихты мала радиальная усушка по сравнению с тангентальной (1 : 2^{1/2}).

Усушка отражается на плотности древесины. В практике расчета сушильных установок применяют не зависящую от усушки *условную плотность* древесины ρ_y (кг/м³), под которой подразумевают отношение массы древесины в абсолютно сухом состоянии m к ее объему V при влажности выше 30%:

$$\rho_y = m/V. \quad (111)$$

Значения условных плотностей и влажностных характеристик древесины основных древесных пород СССР приведены в табл. 6. С учетом понятия *условная плотность* удобно находить количество M (кг/м³) влаги, удаляемой при сушке из 1 м³ древесины, несмотря на изменение при этом ее объема:

$$M = \rho_y(\omega_n - \omega_k)/100, \quad (112)$$

где ω_n — влажность древесины до сушки, %; ω_k — влажность древесины после сушки, %.

Величина усушки, отнесенная к 1% уменьшения количества связанной влаги, называется коэффициентом K усушки. Процент усушки U по данному направлению определится умножением коэффициента усушки (см. табл. 6) на величину умень-

6. Средние показатели плотностей и влажностных характеристик древесины

Породы	Плотность			Коэффициент усушки, % на 1% влажности			Ориентировочная влажность древесины на корню	
	при 12% влажности ρ_{12}	в абсолютном сухом состоянии ρ_0	условная ρ_y	радиальный	тангентальный	объемный	ядровой или спелой	заволожной
Береза	630	600	500	0,28	0,34	0,64	78	78
Бук	650	620	530	0,18	0,35	0,55	—	64
Граб	800	760	630	0,24	0,35	0,61	60	60
Дуб черешчатый	700	650	550	0,19	0,29	0,50	64	72
Ель обыкновенная	450	420	360	0,17	0,31	0,50	40	118
Кедр сибирский	440	410	350	0,12	0,28	0,42	70	115
Клен	690	650	550	0,20	0,32	0,54	51	51
Липа	500	470	400	0,23	0,33	0,58	63	60
Лиственница	660	630	520	0,20	0,39	0,61	82	—
Ольха	530	490	420	0,17	0,30	0,49	84	84
Осина	500	480	400	0,15	0,30	0,47	82	82
Пихта сибирская	380	350	300	0,12	0,31	0,44	101	101
Сосна обыкновенная	500	470	400	0,18	0,31	0,51	33	112
Тополь	460	430	360	0,14	0,28	0,44	111	111
Ясень европейский	690	650	550	0,19	0,31	0,52	35	36
Ясень маньчжурский	660	610	520	0,20	0,32	0,54	78	78

шения влажности в гигроскопическом состоянии (т. е. ниже 30%)

$$U = K(30 - w_k). \quad (113)$$

Например, тонкая, медленно высушиваемая сосновая доска шириной 100 мм, тангентальной распиловки, с начальной влажностью выше 30% и конечной 10%, при $K=0,31$ (см. табл. 6) усохнет на величину $U=0,31(30-10)=6,2\%$, т. е. ее ширина в сухом состоянии будет 93,8 мм.

Для небольших по сечению брусков, на торце которых годовые слои близки к параллельным прямым, направленным под углом α к пропилу, величина усушки U_α (%) бруска по ширине или толщине определится по формуле:

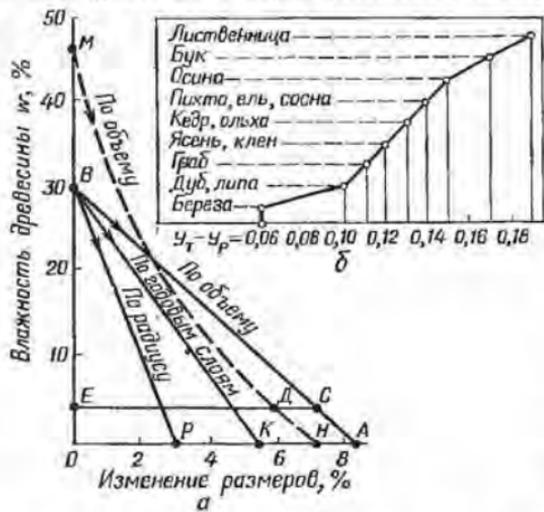
$$U_\alpha = U_p + (U_t - U_p) \cos^2 \alpha, \quad (114)$$

где α — средний угол наклона между касательной к годовым слоям и направлением ширины (или толщины) материала;

U_p — известная усушка по радиальному направлению; U_T — известная усушка по тангентальному направлению.

По (114) получим, что при $\alpha=0$ (т.е. тангентальное направление годовых слоев к направлению ширины бруска) $U_\alpha = U_p + U_T - U_p = U_T$, а при $\alpha=90^\circ$ $U_\alpha = U_p + 0 = U_p$.

Графическая зависимость между влажностью и усушкой древесины для тонких образцов, высыхающих медленно, т.е. равномерно по толщине, представлена в виде прямых BA , BK и BP (рис. 37). При интенсивном процессе сушки нетонких материалов в поверхностной



зоне влажность быстро становится ниже предела гигроскопичности, и эта зона начинает усыхать, когда средняя влажность материала еще выше 30% (точка М). Пропорциональ-

Рис. 37. Закономерности усушки древесины:

a — графическая зависимость между влажностью и изменением размеров древесины; b — разность полной усушки древесины разных пород в тангентальном и радиальном направлении $U_T - U_p$

ность между величиной усушки и снижением влажности древесины при этом нарушается (пунктирная кривая MN). Уменьшается также величина отрезка AO до HO ; это объясняется растяжением древесины на величину AN из-за возникновения при сушке остаточных деформаций.

Таким образом, следует различать свободную усушку древесины как коллоидного тела (отрезок CE при конечной влажности в точке E) и несвободную усадку (отрезок DE). Последняя происходит в результате суммарного изменения размеров древесины из-за потери связанной влаги, остаточных деформаций и возможно от внешних механических воздействий (например, в местах расположения прокладок, также препятствующих усушке по ширине доски). Происходит *растяжение* древесины на величину $ДС$.

Для определения усушки следует вырезать тонкие пластинки (перпендикулярно длине волокон) и, медленно высушивая, периодически определять их массу и размеры.

Усадка древесины примерно равна усушке при медленном высушивании очень тонких пиломатериалов, при сушке древесины токами высокой частоты и т. д., когда не возникает остаточных деформаций из-за перепада влажности по сечению материала. Наоборот, в толстых пиломатериалах, особенно в ус-

ловиях высушивания при повышенных температурах и при скоростных процессах, когда получаются большие остаточные деформации, древесина значительно растягивается и усадка намного меньше усушки.

В некоторой мере величиной усадки древесины можно управлять, выпиливая пиломатериалы соответствующих сечений и применяя режимы сушки, способствующие образованию растягивающих остаточных деформаций; не исключено влияние на древесину и внешних воздействий во время ее высушивания.

Термин *усушка* применительно к большим образцам неточно отражает сущность явления и следуемую из него величину сокращения размеров древесины. Размеры пиломатериалов могут изменяться из-за остаточных деформаций и без изменения их средней влажности (например, в средней зоне подсыхающей толстой доски) или, наоборот, сохраняться с изменением влажности (например, в значительной мере в шиповых соединениях). В производственных условиях происходит усадка пиломатериалов, т. е. обычно меньшее сокращение размеров, чем из-за усушки.

Для разработки норм припусков на усадку были выполнены массовые замеры сечений пиломатериалов в условиях, приближающихся к производственным, с последующей статистической обработкой результатов измерений. На основании таких исследований, проведенных в различных климатических зонах СССР, разработаны соответствующие стандарты. Величина припуска на усадку отсчитывается в миллиметрах. На рис. 38, а дана диаграмма припусков для пиломатериалов хвойных пород в зависимости от их размеров в сухом состоянии. Величина начальной влажности не имеет значения, если она выше 30%. По ГОСТ 6782.1—75 и 6782.2—75 припуски даны в виде таблиц; для лиственницы величина припусков повышается на одну треть.

Чем толще материал, тем меньше удельная (в %) усадка. Так, при конечной влажности 6% для материала размером 300 мм усадка 4,4%, 25 мм — 7,5%. Последняя приближается по величине к усушке. В первом случае величина усадки составляет только около $\frac{1}{2}$ от значения усушки. Таким образом, у толстого сортамента при испарении влаги древесина растянулась на $\frac{1}{2}$ величины усушки (путем воспрепятствования ей и возникновения остаточных деформаций).

При высушивании пиломатериалов методом сублимации их усадка приближается к нулю, а при высокочастотном высушивании будет наибольшей (равной усушке). На рис. 38, б дана диаграмма усадки древесины березы, дуба, клена, ольхи, осины, тополя и ясеня в тангентальном направлении; радиальная усадка равна примерно 0,7 тангентальной. Припуски на усадку, приведенные на рис. 38, относятся к условиям атмосферной сушки пиломатериалов.

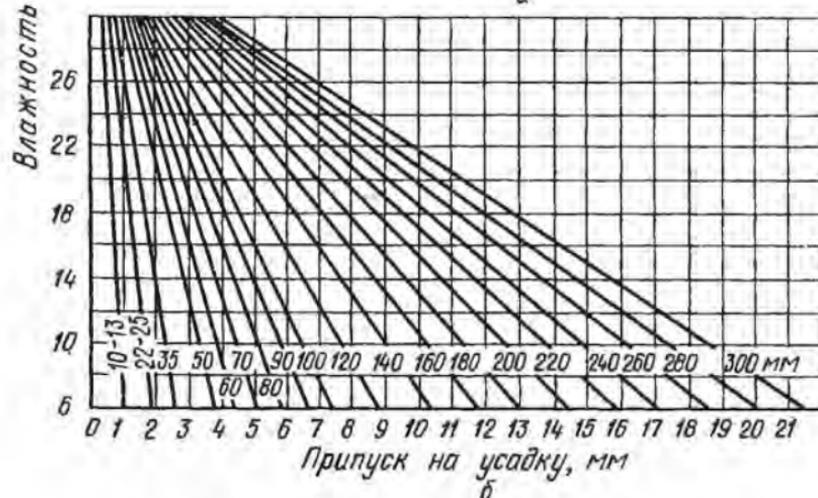
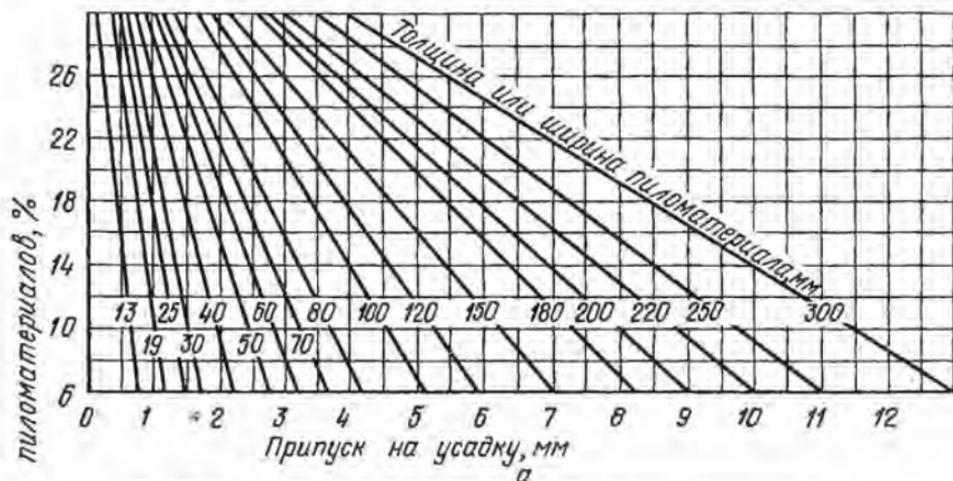


Рис. 38. Диаграммы припусков на усадку пиломатериалов: а — хвойных пород (кроме лиственницы); б — некоторых лиственных пород

25. ДЕФОРМАЦИЯ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ПРИ СУШКЕ

Большое значение для эффективного использования древесины имеют поперечные деформации пиломатериалов, проявляющиеся при сушке. Рассмотрим на торце бревна, распиливаемого на различные пиломатериалы, деформацию вследствие большего усыхания древесины в тангентальном направлении, чем в радиальном (рис. 39, а), считая $U_T - U_R$ — постоянной для всего сечения.

Одно из главных требований к технологии сушки пиломатериалов — получение их ортогональной формы в сухом состоянии. Желательно заранее учитывать усушку древесины и в цех деревообработки подавать материал заданного сечения.

Вследствие большей усушки древесины в тангентальном направлении, чем в радиальном, на торце бревна наблюдаются деформации. Доски, выпиленные из левой части бревна (рис. 39, а) и высушенные в свободном состоянии, приобретут

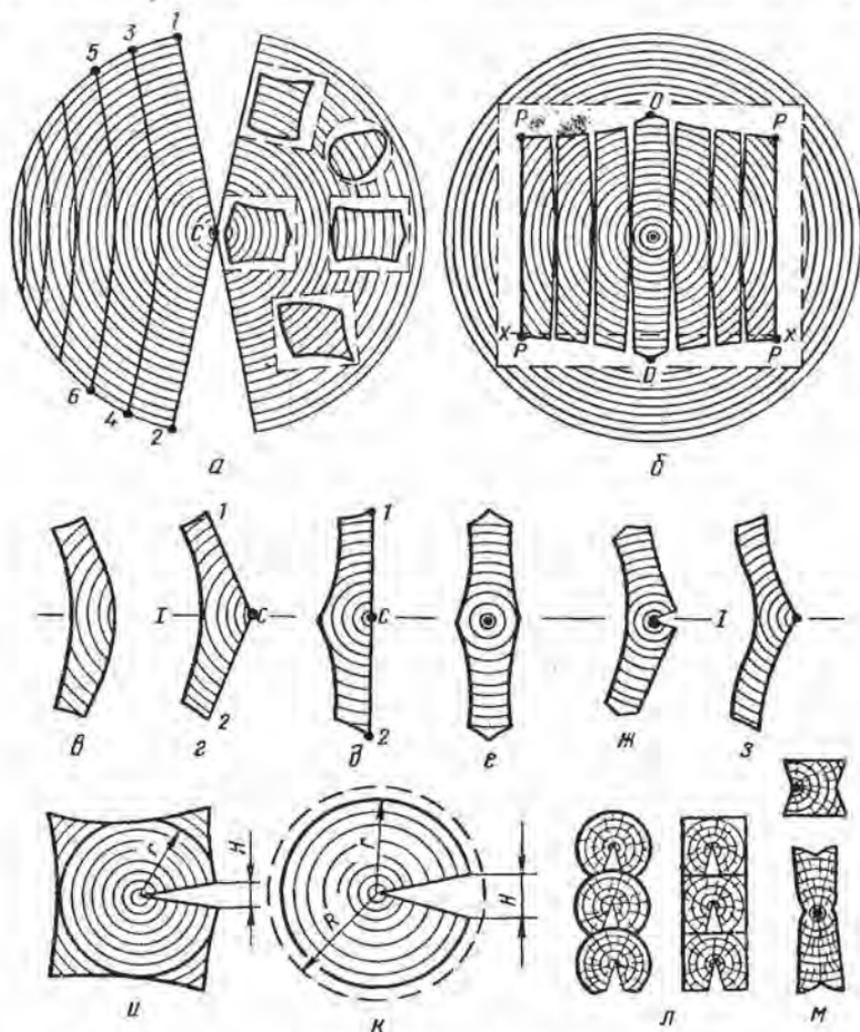


Рис. 39. Поперечные деформации сортиментов древесины из-за ее усушки: а — вырезанных в разных зонах бревна; б — разных досок в поставе; в, з — при свободном деформировании боковой и центральной досок в поставе; д — в зажатом плоском состоянии центральной доски; е, ж — сердцевинной доски без растрескивания и с образованием трещины; з — крыловидной формы; и, к — растрескивание сердцевинного бруса и бревна; л — метод укладки в конструкцию сердцевинных сортиментов с predetermined направлением растрескивания; м — разбухание сортиментов ортогональной формы, подвергавшихся усушке

покоробленность. Пропил 3—4 доски, как полурadiaльный, а в средней части тангентальный, сократится больше, чем радиальный пропил 1—2; поэтому доска приобретет желобчатую форму. Пропил 5—6 будет с меньшей кривизной чем 3—4. По

этой же причине кривизна последующих (к внешней их пла- сти) досок будет уменьшаться — наименьшая покоробленность (% от ширины) возникнет у внешнего пропила крайней доски.

Вопреки схемам, приводимым в технической литературе, кроме самих пропилов (также слегка сужающихся вследствие ожидаемой усушки опилочной пластинки древесины, к ее кром- кам) между досками не возникнет зазоров, — все торцовые кромки медленно высушенных досок полубревна плотно сомк- нутся. Пропилы 1—С и С—2 прямолинейные, а остальные по гиперболическим кривым с вершиной гипербол против сердце- вины бревна.

Наибольшая удельная усушка по ширине обнаружится у бо- ковых досок, а наименьшая — у сердцевинной. По толщине, наоборот, наибольшая усушка возникнет у кромок сердцевин- ной и несколько меньшая — у двух центральных досок (с серд- цевинной на их пласти); наименьшие отклонения усушки по тол- щине будут у крайней боковой доски.

Величина свободной поперечной покоробленности доски ха- рактеризуется стрелой f (мм), определяемой по формуле А. В. Гадолына [19]:

$$f = b \left(\frac{Y_T - Y_D}{100} \right) \operatorname{arctg} \frac{b}{r}, \quad (115)$$

где b — половина ширины доски, мм; r — радиус годового слоя, касательного к измеряемому пропилу, мм; $Y_T - Y_D$ — раз- ность тангентальной и радиальной усушек, %.

Если пропил проходит по сердцевине,

$r = 0$ и $\operatorname{arctg} \frac{b}{r} = \frac{\pi}{2}$, тогда уравнение (115) примет вид

$$f = b \frac{Y_T - Y_D}{100} \cdot \frac{\pi}{2} = 1,57b \frac{Y_T - Y_D}{100}. \quad (116)$$

Например, при ширине доски 200 мм, т. е. $b = 100$ мм, раз- ности усушек $(Y_T - Y_D)/100 = (9 - 5)/100 = 0,04$; тогда по (116) определим $f = 1,57 \cdot 100 \cdot 0,04 = 6,3$ мм.

В правой части сечения бревна (рис. 39, а) пунктиром пока- зана деформация брусков квадратного сечения. Брусок, примы- кающий к сердцевине, примет в целом клиновидную форму, поскольку у правой его грани направление годовых слоев бли- же к тангентальному, следовательно, эта грань больше сокра- тится, чем левая, к которой годовые слои примыкают радиаль- но. Обращает внимание симметричный гребень посредине пра- вой грани, обусловленный радиальным направлением горизон- тальной оси бруска, проходящей через вершину гребня и серд- цевину. Верхняя и нижняя грани бруска приобретут вогнутую форму, аналогично вогнутой кривой 3—4 у центральной доски.

Брусок, расположенный справа в результате сушки полу- чит в основном прямоугольную форму. Левая его грань будет

выпуклой; на правой его грани возникнет небольшой гребень, а верхняя и нижняя грани будут слегка вогнутыми (для наглядности деформации показаны преувеличенными).

В верхнем бруске левая грань останется прямой, как находящаяся на радиусе сечения бревна; нижняя грань окажется выпуклой, аналогично кривой 3—4 для второй доски, а две остальных грани приобретут вогнутую форму.

Нижний брусок, ориентированный диагоналями, получит в целом ромбовидную форму, так как его радиальная диагональ будет иметь минимальную усушку, а тангентальная — максимальную. Две его внутренних стороны (направленные к сердцевине) приобретут выпуклую, а две внешних — вогнутую форму.

Таким образом, все внутренние грани сортиментов на рис. 39, а выпуклые, а внешние вогнутые. Круглое сечение превратится в яйцевидное.

На рис. 39, б пунктиром показан брус, распиленный на доски, медленно высушенные раздельно в зажатом плоском состоянии. Сердцевинная доска получила по ширине минимальную усушку. У обеих крайних боковых досок усушка по ширине будет максимальной по сравнению с остальными досками постава; ее практически можно принимать равной U_T , если ширина бруса больше его высоты в 1,5—2 раза. По кромкам сложенных вместе сухих досок постава можно нанести четыре сопряженных прерывистых кривых — две вверху θ — P и две внизу. Их вершина θ определится величиной радиальной усушки по ширине доски, а горизонтальная их асимптота X — X будет ординатой тангентальной усушки боковых досок.

После высушивания доски окажутся разнотолщинными. Посредине их ширины (т. е. в радиальном направлении к годовым слоям) усушка по толщине минимальная и одинаковая (в %) у всех досок постава. У кромок наибольшая усушка по толщине у сердцевинной и наименьшая у крайней боковой доски (рис. 39, б). Удельная усушка по объему одинаковая у всех досок (если $U_T + U_P = \text{const}$ по всему сечению бревна). На рис. 39, в показана форма свободно высохшей боковой обрезной доски. Крайние боковые доски постава характеризуются минимальной покоробленностью и разнотолщинностью — в этом их положительная особенность.

На рис. 39, г показана форма центральной доски (ГОСТ 18288—72), высохшей в свободном состоянии, а на рис. 39, д в зажатом, с сохранением прямой 1—С—2. Рис. 39, е изображает форму свободно высушенной сердцевинной доски, не получившей растрескивания, а на рис. 39, ж — с характерной сердцевинной трещиной. На рис. 39, з показана покоробленность крыловидной формы для доски с широкой заболонью и иной ее усушкой.

Сортименты, содержащие сердцевину, в результате сушки, почти всегда растрескиваются (рис. 39, ж, и); причина тому — большая усушка по годовым слоям, чем по радиусу, следовательно, потеря геометрического подобия (повышенная усушка по всем годовым слоям замещается клиновидной трещиной, т. е. воздухом). Лишь тонкие доски (толщиной до 35 мм) мягких пород при медленном процессе удается высушивать без растрескивания. Очевидно, при этом в зоне сердцевины по всей толщине доски $Y_p = Y_t$, т. е. в радиальном направлении, древесина остаточного растягивается, а в тангентальном упресовывается. Задача высушивания без растрескивания толстых сердцевинных сортиментов, в том числе бревен, относится к актуальным проблемам теории и техники сушки древесины; очевидно, что если можно высушить в плоском состоянии толстую доску (см. рис. 39, д), будет высушена и симметричная ей доска — они вместе составляют брус. На рис. 39, к показано сечение круглого сортимента радиусом R до сушки и $r = 1 - (Y_p/100)$ после нее. Внешнее годовое кольцо (пунктир) имело размер $2\pi R$ до сушки и будет иметь $2\pi r = 2\pi R[1 - (Y_t/100)]$ после высыхания. Для того чтобы сохранилось кольцо, его длина после высыхания должна быть $2\pi R[1 - (Y_p/100)]$. Разность

$$2\pi R \left(1 - \frac{Y_p}{100}\right) - 2\pi R \left(1 - \frac{Y_t}{100}\right) = 2\pi R \frac{Y_t - Y_p}{100} = H \quad (117)$$

составит величину раскрытия щели H , показанной на рис. 39, к, и. Например, если $R = 10$ см, $Y_t - Y_p = 3\%$, определим $H = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,03 = 1,9$ см. То же произойдет у бруса (рис. 39, и) в который вписывают окружность радиусом r .

Если бревно или сердцевинный брус надрезать продольным радиальным пропилом примерно на глубину $2/3r$, при высыхании древесины трещина образуется только по этому пропилу. Известен прием упрятывания этих трещин внутрь стен рубленых строений и предупреждения затекания в них атмосферной воды (рис. 39, л). Существенно также, что при вертикальном положении трещины в несущей балке ее прочность не снижается.

На каждой половине центральной доски, над или под линией $I-I$ (см. рис. 39, г, д, ж) пласть у сердцевины останется после сушки плоской, а все сечение приобретет форму клина. В малой покоробленности половинок центральных и сердцевинных (рис. 39, е) досок заключается *положительное свойство заготовок радиальной распиловки*; кроме того они меньше растрескиваются. Такие половинки доски приобретают по ширине почти в 2 раза меньшую усадку, чем вырезанные из боковой части бревна (слева на рис. 39, а). Они медленнее проводят влагу по толщине, особенно свободную (преграждают сердцевинные лучи). В связи с этим сортименты радиальной распиловки (но

без сердцевины) применяют для ответственного назначения — музыкальных инструментов, паркета, бочек для жидкостей и т. п.

При увлажнении значительно пересушенной древесины возникают деформации, противоположные показанным на рис. 39, *а—е*. Так, вырезанный против сердцевины бревна (рис. 39, *а*) высушенный и остроганный до квадратной формы брусок, а также строганая в сухом состоянии сердцевинная доска (рис. 39, *е*) при увлажнении изменят ортогональное сечение, как это показано на рис. 39, *м*; боковые строганные доски (см. рис. 39, *в, г* и др.) приобретут обратную покоробленность и окажутся более тонкими посредине ширины.

26. МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Деформации пиломатериалов, обусловленные неодинаковой усушкой древесины в тангентальном и радиальном направлениях, можно уменьшить, используя вязкие свойства древесины. Например, при интенсивном процессе сушки в условиях невысоких температур и сухом воздухе происходит меньшая усадка, следовательно, и деформации меньше. Наоборот, при медленном процессе сушки время релаксации напряжений удлиняется, поэтому возможно высушивание без растрескивания сердцевинных сортиментов (желательно при повышенных температурах и во влажной среде).

Возможные деформации деревянных деталей следует учитывать при разработке конструкции изделия, а также при сушке, механической обработке и применении древесины. В условиях эксплуатации деталь должна быть заданной формы и сечения. Для этого древесина должна быть надлежаще просушена, не должно происходить дополнительной досушки, а следовательно, изменения размеров деталей в готовом изделии. Если влажностные условия среды переменные, полезно покрыть древесину пленкой или даже олифой, замедляющими влагообмен материала со средой.

При изготовлении деревянных щитов доски в щите следует укладывать попеременно наружной пластью вверх и вниз (рис. 40, *а*), что резко снизит возможную деформацию щита при усадке (рис. 40, *б*) или разбухании (рис. 40, *в*) древесины.

Покоробленности пиломатериалов не допускают механическим воздействием, используя вязкость древесины. На рис. 40, *г* показан свободный изгиб кольца лущеного шпона, а на рис. 40, *д* — высушенное кольцо такого же шпона, но механически изогнутого в противоположном направлении, с фиксацией при сушке изогнутого состояния.

Аналогично этому на рис. 40, *е* изображено свободное коробление, а на рис. 40, *ж* — противоположное обычному, полученное путем силового воздействия на материал во время сушки.

Практически способ избежания коробления установлен с учетом многочисленных опытов и наблюдений, показывающих, что доска, хорошо зажатая между прямыми прокладками (рис. 40, *з*), высохнет в почти плоском состоянии.

Пласти доски еще более будут приближаться к плоскостям, если прокладкам придать небольшую локальную (под доской) криволинейность для создания противоположного изгиба доски. Последний прием можно усовершенствовать, если по краям внешнего пропила доски поместить дополнительные подкладки (рис. 40, *и*). Такое силовое противодействие короблению приво-

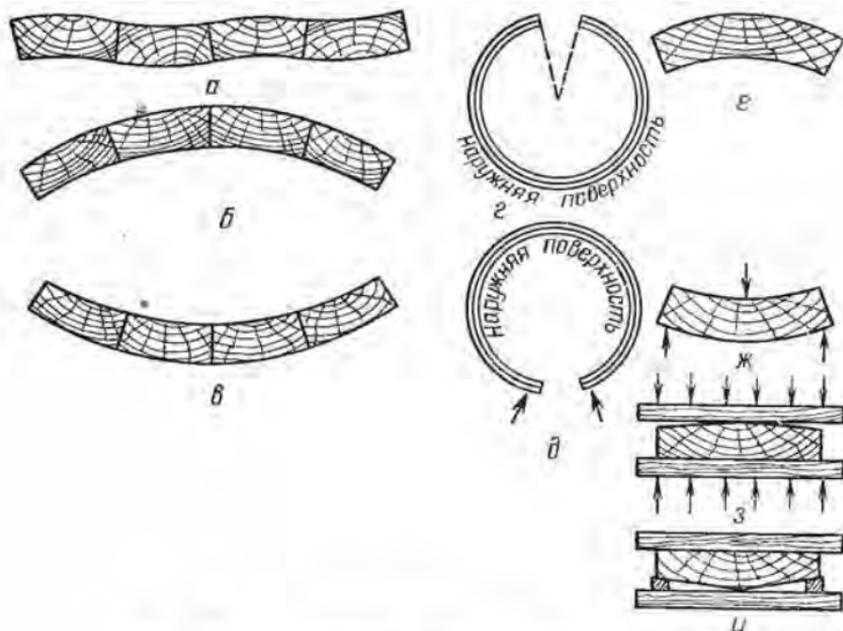


Рис. 40. Поперечная деформация древесины:

а — в шпите с попеременным направлением пластей; *б* — с односторонним направлением пластей при усыхании древесины; *в* — то же при ее разбухании; *г, е* — свободная деформация шпона и доски; *д, ж* — принудительная в противоположном направлении; *з, и* — предотвращение свободной деформации зажатием высушиваемого материала

дит к образованию изгибающих моментов в сечении доски, фиксируемой в плоском состоянии и, следовательно, к возникновению растягивающих касательных напряжений у наружной ее пласти [20], что повышает опасность растрескивания во время сушки плоско зажатых пиломатериалов, в особенности центральных (см. рис. 39, *г*).

Кроме поперечной покоробленности (рис. 41, *а*) в высушиваемых пиломатериалах возникают продольные деформации: на пластъ (рис. 41, *б*), на кромку (рис. 41, *в*) и крыловатость (рис. 41, *г*).

Учитывая свойство вязкости нагретой древесины можно избежать всех этих видов коробления пиломатериалов, если зажать их во время сушки прокладками, используя давление, создаваемое лежащим выше материалом в штабеле (рис. 41, д), прижав также и верхние ряды досок.

Важно учитывать изменение формы поперечных отверстий в доске, заготовках или деталях (рис. 42, а), а также сохране-

Рис. 41. Деформации пиломатериалов при сушке:

а — поперечная покоробленность (желобом); б — продольное искривление на плоскость; в — продольное искривление на кромку; г — крыловатость из-за наклона волокон; д — предотвращение деформирования зажатием в плоском состоянии во время сушки

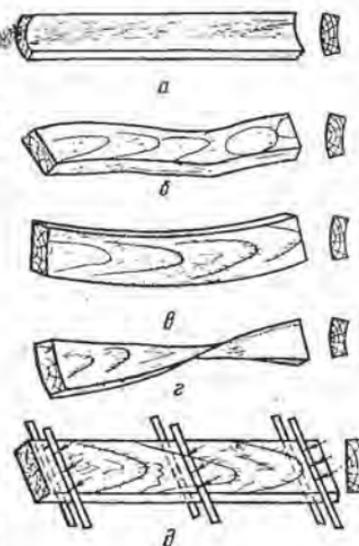
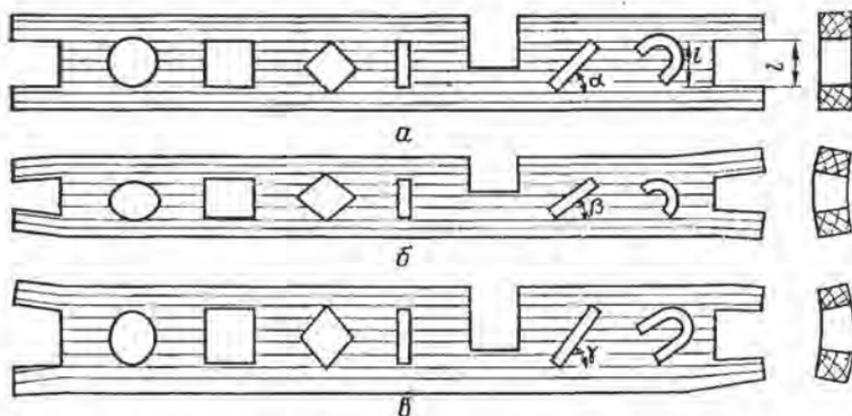


Рис. 42. Изменение формы отверстий в деталях:

а — с постоянной влажностью — исходные отверстия; б — после уменьшения влажности; в — после увеличения влажности древесины (ниже 30%)



ние в течение длительного времени прочности узловых соединений при изменении влажности древесины. Усадкой по длине волокон древесины можно пренебречь.

Существенное значение приобретает сохранение размеров отверстий (рис. 42), а в некоторых условиях их небольшое уменьшение, чтобы находящийся в отверстии, например, нагель был сильнее зажат для упрочнения соединения. В этих целях нагель не должен уменьшаться (усыхать) в своем сечении;

наоборот, желательно его утолщение после сборки деталей, поэтому его следует просушить до более низкой влажности.

При уменьшении влажности древесины в диапазоне ниже 30% круглое отверстие превратится в овальное (рис. 42, б), квадратное в прямоугольное или ромбовидное; щелевидное отверстие, перпендикулярное длине волокон, укоротится и даже может потерять форму параллелепипеда; глубина боковой выемки уменьшится; наклонное щелевидное отверстие не только укоротится, но и уменьшит угол наклона α к длине деталей, а дугообразное — потеряет форму; расстояние l между двумя торцовыми шипами уменьшится, причем шипы потеряют параллельность направления: сначала концы их сойдутся из-за более быстрой сушки приторцового участка (рис. 42, б, слева), а за-

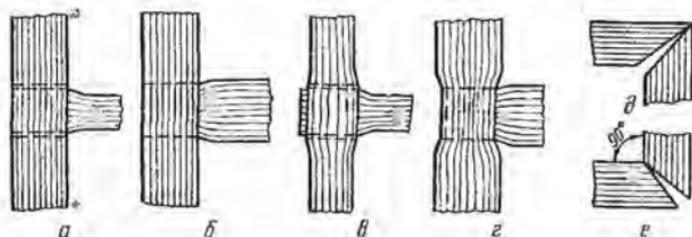


Рис. 43. Деформация шипового соединения:

а — из-за дополнительной усадки шипа; б — при разбухании шипа; в — при усадке обеих деталей; г — при разбухании обеих пересушенных деталей; д — при усадке древесины рамы; е — при разбухании

тем по мере просыхания средней части доски из-за остаточных деформаций расширения древесины в приторцовой зоне разойдутся (рис. 42, б, справа). Значительно пересушенная древесина будет поглощать влагу и разбухать, формы отверстий и шипов изменятся в противоположном направлении (рис. 42, в).

Если в производстве используют недосушенную древесину, она медленно просыхает в готовом изделии. На рис. 43, а показано шиповое соединение с уменьшившейся шириной шипа. В этом случае освобождается часть гнезда по длине (двойная пунктирная линия), клеевая прослойка шипового соединения нарушается, и соединение теряет прочность.

В условиях эксплуатации готовых изделий и устройств некоторое изменение влажности древесины в шиповых соединениях неизбежно. Однако детали не должны быть недосушенными. Предпочтительнее их пересушка, особенно древесины шипа. Желательно, чтобы одновременно с релаксацией напряжений натяга [21] происходило разбухание шипа и он заклинивался (рис. 43, б), т. е. увеличивался натяг [22]. Таким образом, кроме размерного натяга, желательно получить дополнительно влажностный. Для этого влажность древесины шипа должна быть на 2—4% меньше влажности древесины гнезда.

Ослабление шипового соединения при усадке древесины — результат главным образом влажностного уменьшения сечения шипа. Если древесина, образующая гнездо, значительно недоосушена, в готовом изделии постепенно уменьшается глубина гнезда (рис. 43, в). По мере усадки древесины такое соединение ослабляется и разрушается. В изделии, изготовленном из сухой древесины, во влажной среде, например в неотапливаемых помещениях, происходит ее разбухание (рис. 43, г). На рис. 43, д показаны результаты усадки, а на рис. 43, е — разбухания древесины в соединении рамы на ус.

27. ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ И НАГРЕВА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ

Плотность

Влажная древесина состоит из древесинного вещества с плотностью 1530 кг/м^3 (т. е. в 1,53 раза тяжелее воды), жидкой влаги и воздуха. На рис. 44 показано объемное содержание

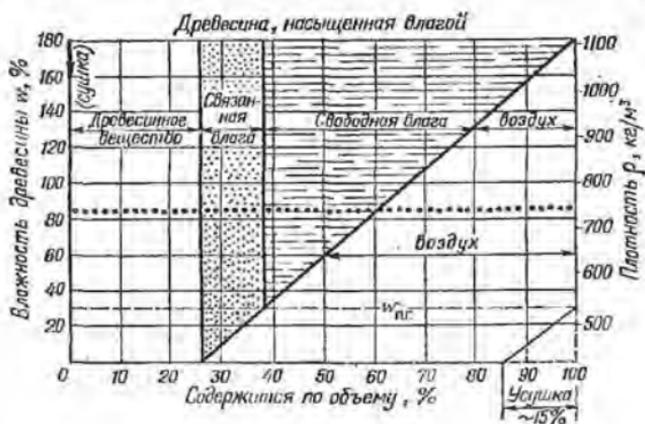


Рис. 44. Объемное содержание в древесине при различной ее влажности древесинного вещества, свободной влаги, связанной влаги и воздуха

(в %) в древесине свободной и связанной влаги, а также воздуха, в зависимости от ее влажности при 20°C . Количество и объем древесинного вещества при сушке неизменны. Верхняя горизонталь характеризует древесину, насыщенную водой, с максимально возможной влажностью w_{max} (воздуха нет); линия точками характеризует свежесрубленную древесину; пунктирная линия — влажность предела гигроскопичности $w_{\text{пг}}$, когда свободной влаги нет, и нижняя горизонталь (ось абсцисс) показывает нулевую влажность, т. е. нет также и связанной влаги. Процесс сушки соответствует направлению по ординате сверху вниз, а увлажнения — снизу вверх. Справа внизу

выделен (пунктиром) треугольник усушки древесины. Диаграмма построена в масштабе величин применительно к древесине сосны.

Плотность древесины всех древесных пород зависит от влажности. С увеличением влажности, т.е. заменой воздуха,

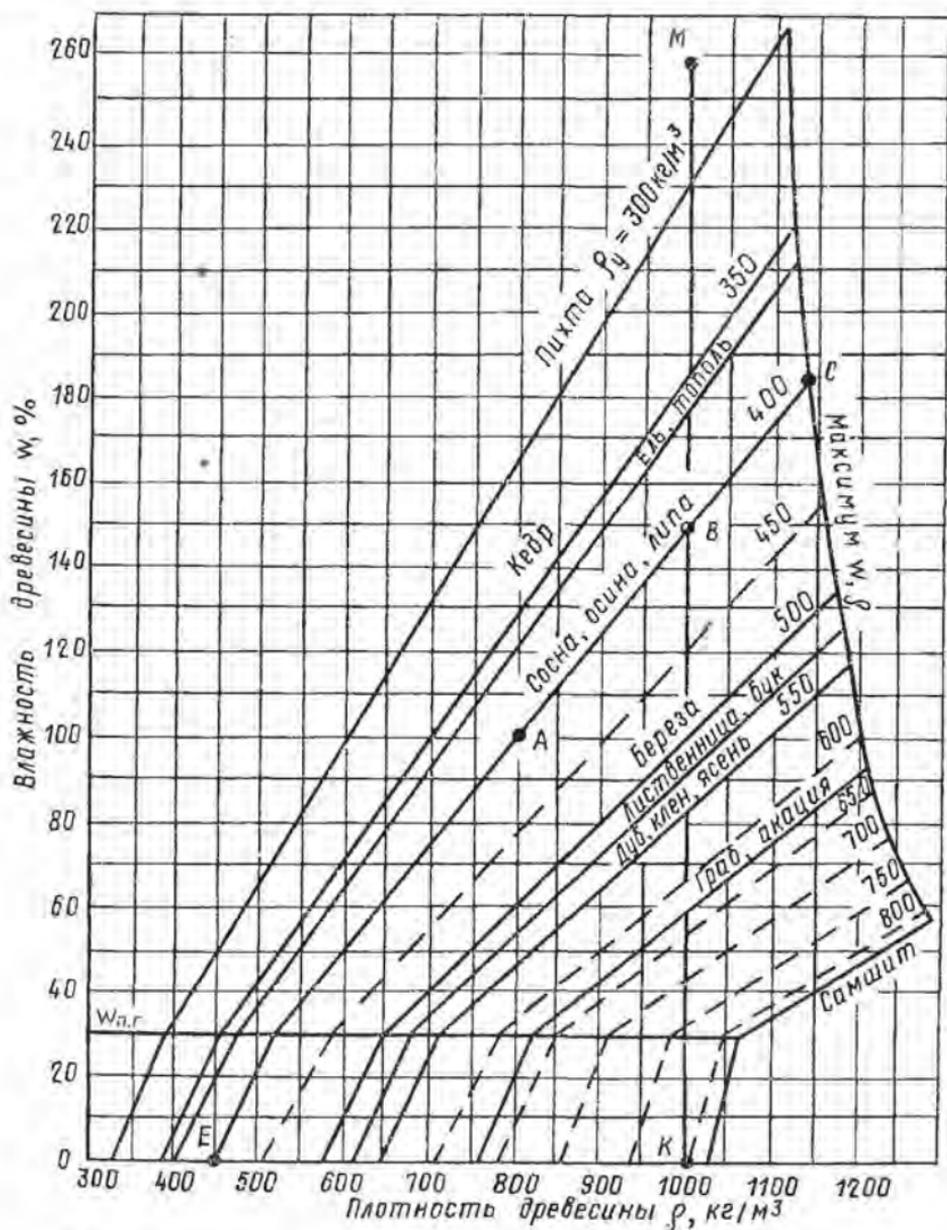


Рис. 45. Плотность древесины в зависимости от ее влажности:

точка А — плотность сосны, осины и липы 800 кг/м^3 при влажности 100% ; точка В — плотность той же древесины 1000 кг/м^3 при влажности 150% ; точка С — максимальная плотность 1140 кг/м^3 той же древесины при ее наибольшей влажности 185% ; точка Е — минимальная плотность той же древесины 450 кг/м^3 при влажности 0%

находящегося в древесине, водой плотность древесины повышается и наоборот. Для древесины сосны шкала плотности нанесена на рис. 44 справа.

Графическая зависимость между плотностью древесины и ее влажностью представлена в виде двух семейств наклонных линий (рис. 45): пунктирных, нанесенных для различных условных плотностей древесины ρ_y кг/м³, различаемых цифрами справа диаграммы (300, 350 и т. д.), и сплошных линий, отвечающих определенной древесной породе. Некоторые пунктирные и сплошные линии совпадают, что показано совмещением на одной линии цифровых значений ρ_y и наименования древесных пород. На горизонтали $w_{п.г} = 30\%$ линии приобретают излом, обусловленный усушкой (набуханием) древесины при влажности 0—30%.

На диаграмме рис. 45 удобно отсчитывать: плотность древесины различных пород при любой их влажности, в том числе в абсолютно сухом состоянии, при приведенной влажности 12 или 15% и т. д.; максимально возможную плотность; максимально возможную влажность; снижение плотности древесины при потере ею части влаги; условную плотность для каждой породы и т. д. Из диаграммы следует, что в зоне правее вертикали *КМ*, пересекающей наклонные линии в точках определенных значений влажности, древесина будет тонуть в воде. Тяжелые древесные породы тонут при низкой влажности (граб при $w > 60\%$), а легкие — при очень высокой (пихта при $w > 230\%$).

Тепловые свойства

Теплота адсорбции древесины (интегральная) характеризует энергию связи Q взаимодействующих веществ, для нахождения которой пользуются уравнением физико-химической термодинамики [14]:

$$Q = RT \ln \frac{P_n}{P_n} = -RT \ln \varphi. \quad (118)$$

Величина φ (в диапазоне 0—1) при медленной сушке толстых сортиментов близка к состоянию равновесия влаги воздуха с влагой древесины.

Зависимость $w'_p(\varphi)$ устанавливаются по (102)

$$w'_p = w_0 + B\varphi, \quad (119)$$

$$\text{где } B = 0,72 [29,5 - (T/100)^2]. \quad (120)$$

Подставив значение φ из (119) в (118), получим для древесины при $T = \text{const}$

$$Q = RT \ln \left(\frac{w'_p - w_0}{B} \right). \quad (121)$$

Согласно этому уравнению построена диаграмма (рис. 46, а) зависимости теплоты адсорбции от равновесной влажности древесины. Пунктиром нанесены линии $\varphi = \text{const}$ для $\varphi = 0,1 \dots 0,5$. При φ более 0,5 и температуре 50°C (когда $w_p > 8\%$) теплота адсорбции будет ниже 125 кДж/кг влаги (30 ккал/кг), т. е. менее 5% от теплоты испарения.

При $w_p = \text{const}$ с понижением температуры теплота адсорбции возрастает, что согласуется с зависимостью $w(t, \varphi)$ (см. рис. 29—33), по которой при $\varphi = \text{const}$ с понижением температуры количество связанной влаги в древесине возрастает.

В процессе сушки пиломатериалов расход теплоты на испарение влаги следует учитывать не по средней, а по поверхностной влажности высушиваемого сорта, близкой к состоянию равновесной влажности сушильного агента, т. е. добавлять дифференциальную теплоту набухания гигроскопического вещества.

В связи со спецификой динамики сушки пиломатериалов можно получить в аналитической [11] и графической форме (рис. 46) значение дифференциальной теплоты набухания. Ее закономерности описываются гиперболическим уравнением, производным от (121). Получаемые величины dQ/dw согласуются с результатами экспериментов [15] и [23] при выбранном частном значении температуры (50 и $62,5^\circ \text{C}$).

Для кривой Стамма (см. рис. 27, б) кроме (99) близким к опытным данным будет также уравнение гиперболы, кДж/кг или ккал/кг без множителя 4,19:

$$dQ/dw = [4,19 \cdot 597 / (w + 1,7)] - 20. \quad (122)$$

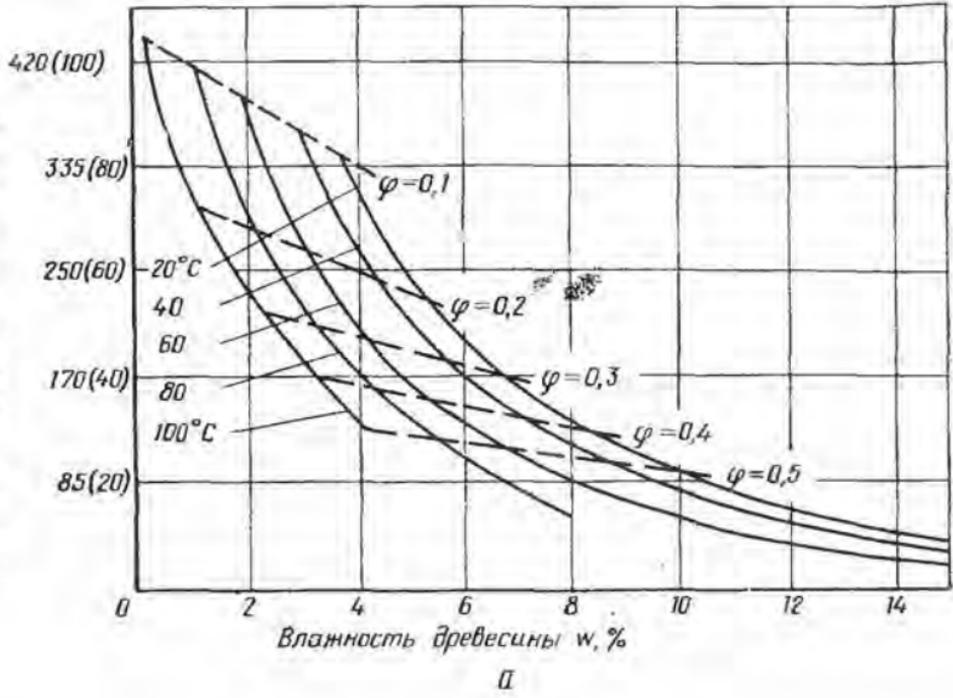
При влажности w поверхности материала более 20% величина dQ/dw небольшая и может не рассматриваться в технических расчетах; при жестких режимах сушки эта величина может быть значительной, например при высушивании стружки или тонких сортиментов. В полулогарифмических координатах зависимости (99) и (122) близки к прямым.

Теплоемкость древесины c_d зависит в основном от ее влажности и температуры. В приближенных расчетах для любой породы при $w > 8\%$ она может быть определена с учетом правила аддитивности по формуле Денлопа, $\text{кДж/(кг} \cdot ^\circ \text{C)}$ [или $\text{ккал/(кг} \cdot ^\circ \text{C)}$ без множителя 4,19]:

$$c_d = 4,19 \left(\frac{26,6 + 0,116t + w}{100 + w} \right). \quad (123)$$

При $w < 8\%$ должна быть учтена также теплота адсорбции. На рис. 47, а приведена диаграмма удельной теплоемкости древесины всех пород при различной ее влажности и температуре [18]. Например, при влажности $w = 100\%$ и $t = 60^\circ \text{C}$ теплоемкость древесины по диаграмме $3,34 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ \text{C)}$ [$0,80 \text{ ккал/(кг} \cdot ^\circ \text{C)}$].

Теплота адсорбции, кДж/кг(ккал/кг)



Дифференциальная теплота набухания, кДж/кг(ккал/кг)

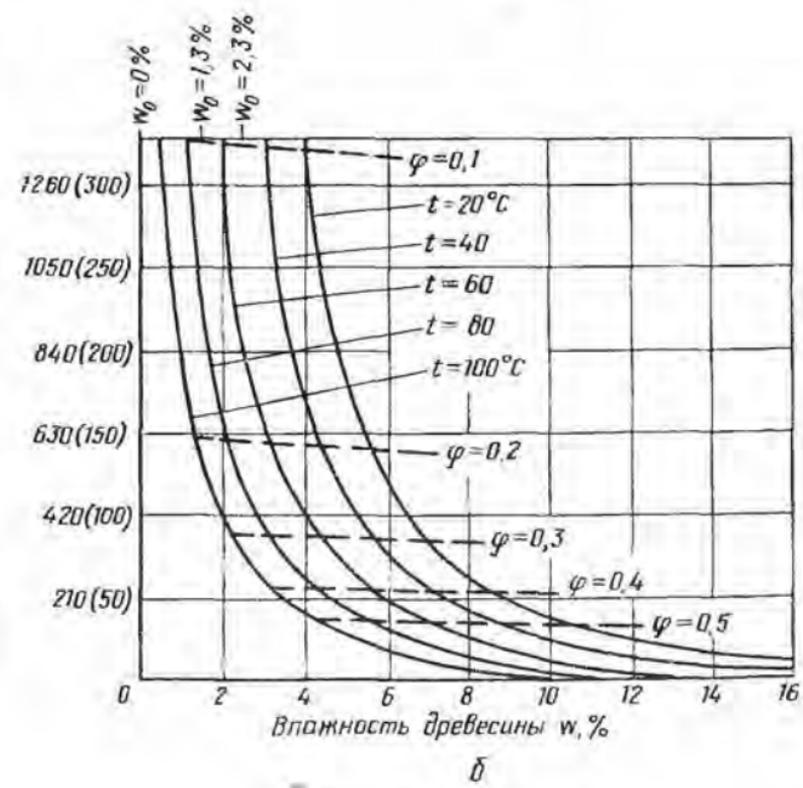


Рис. 46. Диаграммы:

а — теплоты адсорбции; б — дифференциальной теплоты набухания древесины

Теплопроводность древесины зависит от ее плотности, влажности и направления теплового потока по отношению к длине волокон. Чем больше плотность и влажность, тем выше теплопроводность древесины. На диаграмме (рис. 47, б) проведены линии для коэффициентов теплопроводности древесины с условной плотностью $\rho_y = 360 \text{ кг/м}^3$ в тангентальном направлении при различных ее температуре и влажности. Для радиального направления древесины некоторых пород введен множитель 1,15, а для направления вдоль волокон — около 2 [24]. При иной плотности древесины вводятся следующие поправочные коэффициенты:

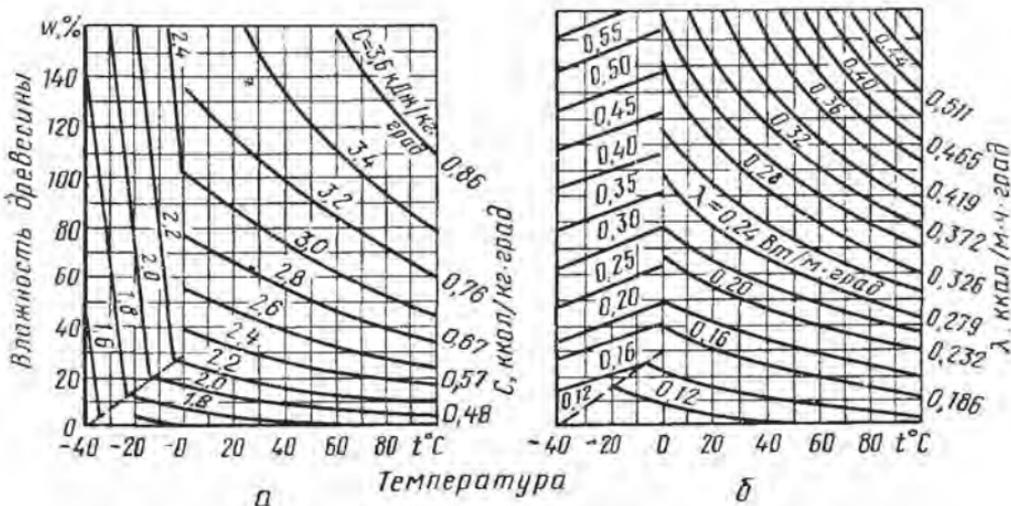


Рис. 47. Диаграммы:

а — коэффициента удельной теплоемкости древесины c_d , ккал/(кг·град); б — коэффициента теплопроводности древесины λ ккал/(ч·м·град)

Плотность древесины ρ_y	3.0	400	450	500	515	550	600	700	800
Поправочный коэффициент									
K к рис. 47, б	1	1,04	1,1	1,2	1,25	1,36	1,58	2,16	2,94
То же K' к рис. 48, б	0,8	0,83	0,88	0,96	1	1,09	1,36	1,73	2,35

Например, при влажности древесины $w = 100\%$, $t = 50^\circ \text{C}$ коэффициент теплопроводности в тангентальном направлении по рис. 47, б $\lambda_t = 0,302 \text{ Вт/(м·К)}$ [$0,26 \text{ ккал/(ч·м·}^\circ \text{C)}$], а с учетом плотности древесины 500 кг/м^3 будет $0,362 \text{ Вт/(м·К)}$ [$0,312 \text{ ккал/(ч·м·}^\circ \text{C)}$].

Температуропроводность древесины показывает ее теплоинерционные свойства. Чем больше температуропроводность, тем быстрее древесина нагревается (а также быстрее выравнивается разность температур в ней при отсутствии подвода

тепла). Коэффициент температуропроводности a определяют по формуле (и находят размерность):

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\text{кДж}}{\text{ч} \cdot \text{м} \cdot ^\circ\text{С}} \cdot \frac{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{м}^3}{\text{кДж} \cdot \text{кг}} = \text{м}^2/\text{ч} \right). \quad (124)$$

Величина a мало зависит от плотности древесины. Для легкой древесины [24] она больше на 5—10%. Коэффициенты эффективной и истинной температуропроводности поперек волокон приведены графически на рис. 48. В приближенных расчетах

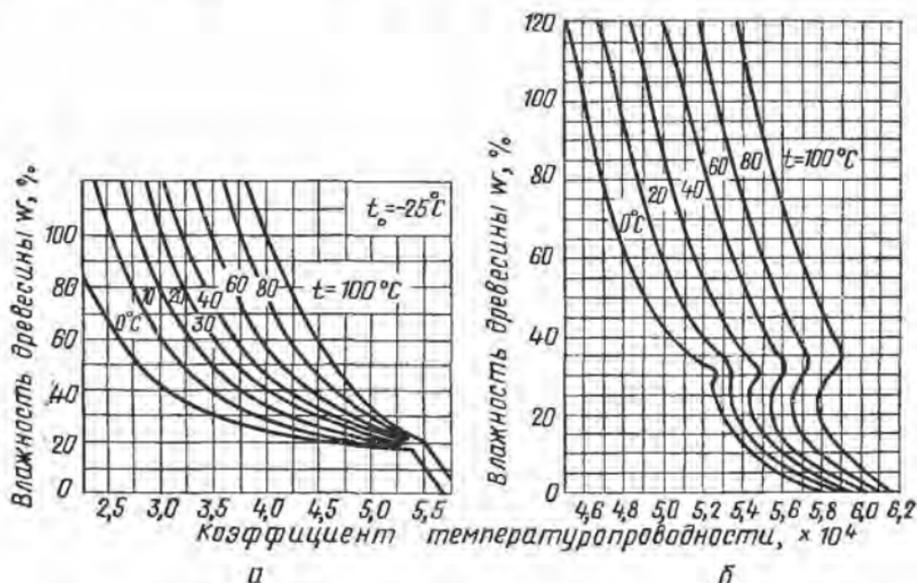


Рис. 48. Коэффициенты температуропроводности поперек волокон древесины при $\rho_y = 515 \text{ кг/м}^3$.

a — эффективной, при начальной температуре -25°С ; b — истинной, при положительных температурах

для повышенной влажности древесины сосны, ольхи, осины и липы при нагреве в области положительных температур можно принимать $a \approx 0,0004$, для влажной древесины лиственницы, березы, бука, а также сухой древесины сосны, ольхи, осины и липы $a \approx 0,0005 \text{ м}^2/\text{ч}$.

В направлении длины волокон величина a аналогично коэффициенту λ может приниматься удвоенной, т. е. $a'' = 2a'$. Ненагретая древесина торцовых поверхностей на ощупь холоднее, чем поверхностей пластей, из-за более интенсивного отвода тепла вдоль волокон.

Тепловое расширение древесины неодинаково в различных направлениях. При влажности ниже предела гигроскопичности наибольшее расширение древесины в тангентальном направлении, наименьшее — по длине волокон. Если коэффициент линейного расширения стали принять за единицу ($\Delta l/l =$

$\approx 11 \cdot 10^{-6}$), для древесины вдоль волокон он будет 0,3—0,4, в радиальном направлении 2—3, в тангентальном 3—4, т. е. древесина по длине волокон расширяется примерно в 3 раза меньше, а в поперечном направлении в 3 раза больше, чем сталь. Замечено, что при нагревании во влажном состоянии могут уменьшаться размеры древесины в радиальном направлении.

Модуль упругости древесины дуба и березы в поперечном к длине волокон направлении примерно в 20 раз, сосны и ели в 25 раз меньше, чем вдоль волокон. Модуль упругости древесины сосны при влажности 12% и $t=20^\circ\text{C}$ в тангентальном направлении на сжатие ≈ 500 МПа, на растяжение ≈ 430 МПа, а дуба соответственно ≈ 910 МПа и ≈ 830 МПа. Пересчитывают модуль упругости при иной влажности древесины по ГОСТ 16483.9—73:

$$E_w = F_{11} [1 - (w - 12)]. \quad (125)$$

У древесины сосны, нагреваемой от 50 до 90°C , значение модуля упругости в тангентальном направлении снижается примерно вдвое [17].

Из рассмотренного следует также, что растрескивается древесина из-за влажностных, а не термических деформаций. Даже морозобоины — это следствие не сокращения размеров охлаждаемой древесины, а превращения жидкой влаги в твердую. Например, боковая в поставе сосновая доска шириной 100 мм при уменьшении гигроскопической влаги на 1% сожмется по ширине примерно на 0,3 мм (113), а термическая ее деформация при охлаждении на 1°C будет около $100 \cdot 3 \cdot 11 \cdot 10^{-6} = 0,003$ мм, т. е. в 100 раз меньше.

Электрические свойства

Сухая древесина — диэлектрик. Ее электропроводность быстро возрастает с увеличением влажности до предела гигроскопичности. При дальнейшем повышении влажности электропроводность увеличивается медленно, а при влажности выше 80—100% устанавливается постоянная (рис. 49, а).

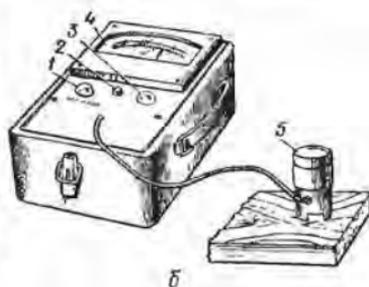
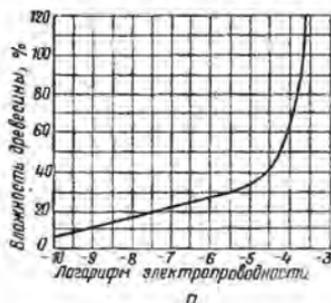


Рис. 49. Электропроводность древесины и ее применение для измерения влажности:

а — зависимость электропроводности от влажности древесины; б — электровлажномер для определения влажности: 1 — ручка для балансировки системы; 2 — кнопка включения; 3 — переключатель диапазонов влажности; 4 — шкала прибора; 5 — датчик с иглами

Электропроводность древесины в радиальном и тангентальном направлениях примерно одинакова, а по длине волокон — в 2 раза больше (так же, как и теплопроводность). По этому принципу конструируют влагомеры.

На рис. 49, б показан электровлагомер ЭВ-8-100, разработанный ЦНИИМОДом. Прибор питается током от электросети и позволяет определять влажность древесины в диапазонах 6—18; 18—30 и 30—100%. Датчиком являются иглы, внедряемые во внутреннюю пластль доски; между иглами по направлению вдоль доски пропускается ток. По отклонению стрелки прибора устанавливают влажность древесины.

Диэлектрическая постоянная древесины дуба и бука вдоль волокон $\approx 2,5$, поперек волокон $\approx 3,6$ (для воды — 81, для сухого воздуха принято 1).

Влияние влажности на механические свойства

Количество свободной влаги (т. е. выше 30%), находящейся в древесине, мало влияет на ее прочность. С уменьшением количества связанной влаги прочностные показатели древесины улучшаются. Так, предел прочности сосны при статическом изгибе в условиях комнатной температуры увеличивается с 50 до 110 МПа (с 500 до 1100 кгс/см²) при уменьшении влажности с 30 до 8%.

При влажности ниже 30% увеличивается также прочность на сжатие вдоль и поперек волокон, сопротивление скалыванию, а также твердость древесины. Однако изменение влажности древесины в любом диапазоне почти не влияет на прочность при ударном изгибе, а также на сопротивление выдергиванию гвоздей немедленно после их забивания.

Влияние нагревания на механические свойства

Оценка теплового воздействия на прочность древесины возможна при испытаниях в нагретом ее состоянии, а также после охлаждения. Первое условие имеет значение для построения и регулирования режима сушки, чтобы не допустить растрескивания древесины, а второе показывает влияние нагрева на изменение физико-механических свойств древесины как материала, используемого затем в обычных температурных условиях.

В кратковременно нагретом состоянии предел прочности древесины сосны при растяжении в тангентальном направлении $\sigma_{\text{пр}}$ снижается [17] тем больше, чем выше влажность древесины (0—25%) и ее температура (от 50 до 90°С):

$$\sigma_{\text{пр}} = a - bt. \quad (126)$$

По этой формуле при влажности древесины 6; 12, 18 и 24% величина a составляет соответственно 49; 44; 34 и 27, а коэффициент b соответственно 0,30; 0,29; 0,26 и 0,23. Отсюда следует, что прочность древесины, нагреваемой от 50 до 90°С, уменьшается так же, как и модуль упругости, примерно в 2 раза. На снижение прочности влияет также продолжительность нагрева.

На рис. 50, а показан предел прочности березы при растяжении в тангентальном направлении, а на рис. 50, б то же для длительного модуля упругости при растяжении и сжатии в нагретом состоянии [27]. Как видно, предел прочности и модуль упругости снижаются по мере повышения температуры древесины, но повышаются при высыхании древесины ниже предела гигроскопичности.

Прочность нагревавшейся древесины после ее охлаждения понижается при воздействии температуры выше 60°С и тем больше, чем выше температура; во влажном состоянии древесины происходит большее снижение ее прочности.

На рис. 50, в показан предел прочности нагревавшейся древесины сосны, изучавшейся под действием различных нагрузок. Наиболее резко снижает прочность древесины на скалывание и раскалывание. После значитель-

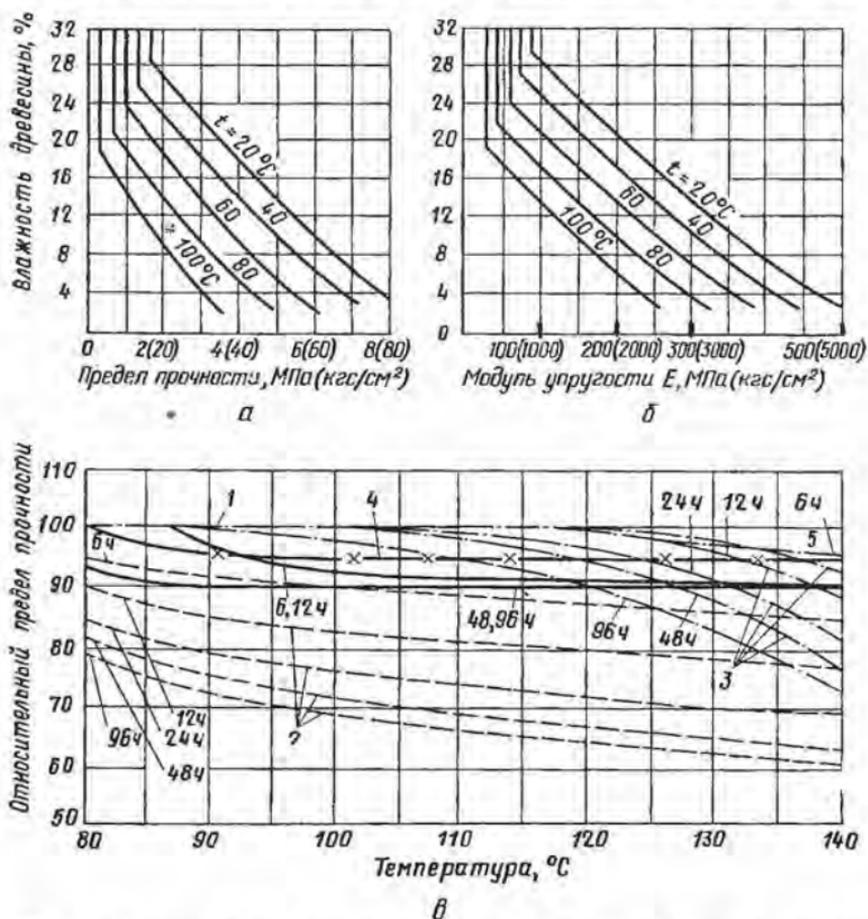


Рис. 50. Изменение прочностных показателей древесины при влажностном и температурном воздействиях:

а — предел прочности нагретой березы при растяжении в тангентальном направлении; *б* — модуль упругости нагретой березы в тангентальном направлении; *в* — предел прочности нагретой сосны при видах испытаний: 1 — сжатие; 2 — складывание; 3 — раскалывание; 4 — растяжение вдоль волокон и статический изгиб; 5 — ударный изгиб

ного нагрева древесина становится хрупкой. Гигроскопичность значительно нагревавшейся древесины уменьшается — происходит частичная деструкция молекулярного строения; древесина теряет натуральный цвет и темнеет; начинается ее термическое разложение.

Губительно отражаются на механических свойствах древесины переменные сушка и увлажнение (особенно при повышен-

ных температуре t и влагосодержании d), сопровождаемые периодическим нагревом и охлаждением. В этом легко убедиться на практике, наблюдая за деревянными дверями или устройствами в сушильных камерах, а также внутриштабельными прокладками, быстро теряющими прочность в условиях их использования.

В технологии деревообработки основным фактором, влияющим на качество изделий (длительную прочность и их ресурс), является соблюдение минимальной допустимой влажности древесины и ее равномерности. Перед механической обработкой и склейкой влажность древесины должна быть не выше заданной техническими условиями и распределена равномерно по объему штабеля, а также сечению сортимента; не должно оставаться и напряжений, возникающих во время сушки.

ГЛАВА 5. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ

28. ХАРАКТЕР ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРОЦЕССА СУШКИ

Остановимся на физических явлениях, сопутствующих удалению влаги из единичного образца материала (доски, фанерного шпона и т. д.), не касаясь действия самого сушильного агрегата. Выделим физические процессы, обуславливающие продолжительность сушки и качественное состояние высушенной древесины.

При изучении физических явлений, относящихся к сушке материалов, обычно рассматривают: а) характеристику и изменение свойств воздуха (или продуктов сгорания) как сушильного агента (термодинамика сушки); б) формы связи влаги с гигроскопическим материалом (статика сушки); в) нагревание и охлаждение материала (теплопередачу); г) влагообмен на граничной поверхности воздух — материал; д) продвижение влаги из толщи к поверхности материала (динамику сушки); е) закономерности протекания процесса сушки во времени (кинетику сушки); ж) изменение состояния нагретой влажной древесины как упруго-вязкого тела во времени (реология материала).

В начальный период сушки из материала удаляется часть свободной влаги. Ее испарение с поверхности материала с некоторыми допущениями можно приравнять к достаточно изученному испарению воды со свободной поверхности [2].

Для упрощения анализа сложных явлений сушки можно считать в отдельные промежутки времени процесс стационарным или регулярным, а параметры среды и влажностные свойства материала постоянными.

В общем виде сушку материалов в физическом отношении можно рассматривать как сопряженный комплекс явлений и процессов (подвода тепла, теплообмена, перемещения влаги в материале и пара в воздухе и др.), обуславливающих непрерывное превращение влаги материала в парообразное состояние и ее удаление.

29. ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАГРЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Конвективный процесс сушки нагретым воздухом или продуктами сгорания состоит из трех последовательных этапов: нагревания влажных пиломатериалов (2—6%), собственно сушки (95—85%) и охлаждения высушенной древесины (2—6% от общей продолжительности сушки); первая цифра относится к толстым сортаментам твердых пород. Рассмотрим сначала поток тепла через стенку.

Из теории теплопроводности известно, что тепловой поток q внутри твердого тела пропорционален градиенту температуры dt/dx в направлении x потока и коэффициенту теплопроводности λ :

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (127)$$

Знак минус показывает, что поток направлен в сторону понижения температуры тела. При постоянном значении λ и конечных величинах t и x это соотношение будет иметь вид

$$q = -\lambda \frac{t_1 - t_2}{x_1 - x_2} = \lambda \frac{t_1 - t_2}{x_2 - x_1} = \frac{\lambda}{b} \Delta t, \quad (127a)$$

где $t_1 - t_2 = \Delta t$ — разность температур на пути $x_1 - x_2$ потока тепла; b — протяженность потока (например, толщина стенки).

Режим теплового потока может быть стационарным и нестационарным. *Стационарный* режим характеризует тепловой поток, проходящий через стенку (ограждение сушильной камеры, стенку калорифера и т. д.), когда неодинаковые температуры по обе ее стороны сохраняются постоянными во времени; при этом внутри стенки устанавливается неизменное температурное поле. Если коэффициент теплопроводности стенки (однослойной) постоянный, температура по ее толщине распределяется по линейной закономерности, как это показано отрезком ac на рис. 51.

Количество тепла Q , передаваемое через стенку,

$$Q = k(t_1 - t_2) F = \alpha_1(t_1 - t_3) F, \quad (128)$$

где k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К) [ккал/(м²·ч·°С)]; F — площадь стенки, нормальная к тепловому потоку, м²; t_1 и t_2 — температуры среды по обе стороны стенки, °С; t_3 — температура первой (по току тепла) поверхности стенки.

Коэффициент k теплопередачи многослойной стенки находят из соотношения

$$k = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\alpha_2} \right), \quad (129)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплообмена 1 и 2 поверхностей стенки; b_1, b_2, \dots — толщина слоев, составляющих стенку (для однослойной стенки в знаменателе средним членом будет b_1/λ_2); $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ — соответствующие коэффициенты теплопроводности слоев.

Коэффициенты теплообмена α_1 и α_2 зависят от характера конвекции потоков среды у граничных поверхностей 1 и 2 и, следовательно, толщины пограничных слоев δ_1 и δ_2 (см. рис. 51), а также их теплопроводности.

Конденсация влаги на внутренней поверхности ограждений сушильных камер — результат неправильного выполнения ограждений или нарушения нормального теплового режима их эксплуатации. По ряду причин (порча ограждений, локальное увлажнение конденсатом высушиваемого материала и т. д.) такая конденсация влаги нежелательна. Так как по рис. 51 к $(t_1 - t_2) = \alpha_1(t_1 - t_3)$, то

$$t_1 - t_3 = k(t_1 - t_2)/\alpha_1. \quad (130)$$

Для предупреждения конденсации влаги необходимо, чтобы температура точки росы t_p сушильного агента (по Id -диаграмме точка P на рис. 9, а) была ниже температуры t_3 внутренней поверхности ограждения, как это показано слева на рис. 51.

Например, при разности температур среды по обе стороны ограждения $t_1 - t_2 = 100^\circ\text{C}$, $k = 0,6$ и $d = 12$ получим, что перепад температур сушильного агента у внутренней поверхности ограждения $t_1 - t_3 = 60/12 = 5^\circ\text{C}$. Следовательно, для предотвращения конденсации влаги на ограждении величина $t_1 - t_p$ (или практически психрометрическая разность сушильного агента $t - t_m$; см. рис. 9, б) должна быть в этих условиях больше 5°C . При интенсивной циркуляции воздуха в камере, когда α_1 возрастет, психрометрическую разность можно безопасно уменьшить соответственно ниже 5°C ; можно также снизить k — улучшением теплоизоляции ограждения.

Нестационарный режим характеризуется переменным в пространстве и времени температурным полем в нагреваемом или охлаждаемом теле. Если в процессе нагревания или охлаждения прекратилось влияние параметров начального теплового состояния тела, а температура среды сохраняется неизменной, тепловой режим тела называется *регулярным*.

При рассмотрении процессов нагревания и охлаждения необходимо раскрыть закономерности распределения температурного поля в поперечном сечении, в первую очередь по толщине плоского материала (доски), а также более точно определить расчетным путем продолжительность нагревания подлежащей высушиванию древесины и ее кондиционирования с охлаждением в сухом состоянии. Ввиду большого разнообразия производственных

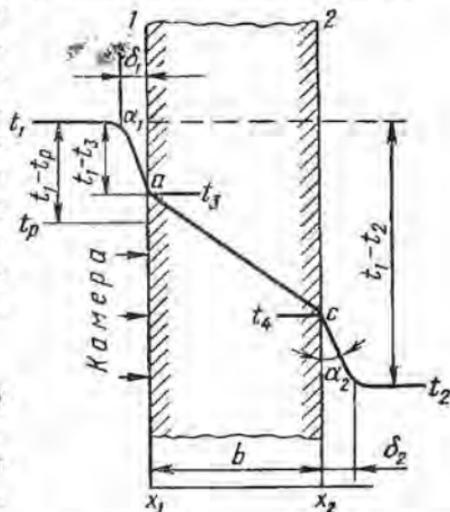


Рис. 51. Теплопроводность через плоскую однослойную стенку при стационарном режиме

условий и желания получить универсальные решения ответы следует находить, пользуясь обобщенными методами расчетов.

В целях упрощения можно принять некоторые допущения и ограничения. Так, в отношении распространения тепла по поперечному сечению доски древесины можно приравнять к изотропному телу за исключением случаев, когда предопределено достаточно ориентированное направление теплового потока в радиальном или в тангентальном направлении. Начальную температуру древесины будем считать одинаковой по всему объему, температуру среды постоянной как над всей поверхностью материала, так и во времени. Примем также, что тепло распространяется лишь в направлении по толщине материала, имеющего форму бесконечной пластины, т. е. оставим пока без учета влияния боковых кромок (в брусках) и торцовых поверхностей материала на нагревание. Таким образом, будем рассматривать одномерную задачу.

Из основ теплопередачи известно, что при нестационарном тепловом режиме применительно к одномерной задаче закон распределения температур (по толщине пластины) описывается дифференциальным уравнением Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (131)$$

где a — коэффициент температуропроводности [см. (124)], $m^2/ч$; τ — время, ч; x — координата в направлении теплового потока, м.

Уравнение (131) отражает зависимость между скоростью нагревания (в левой части), тепловыми свойствами тела (коэффициентом a) и градиентами температур в теле (второй производной от температуры t по координате x).

При анализе и решении сложных тепловых явлений и процессов, а также обработке и обобщении данных экспериментальных исследований в теории теплопередачи применяют безразмерные теплофизические комплексы, называемые *критериями теплового подобия*. Эти же критерии распространяются и на процессы сушки для изучения миграции влаги в материале, ее испарения и т. д., и тогда их называют *гигрометрическими* или *влагообменными критериями подобия* [28]. Применительно к нагреванию и сушке древесины используют безразмерные критерии теплового, гигрометрического и гидродинамического подобия, приведенные в табл. 7.

Решение (131) при указанных выше допущениях и ограничениях приводит к выявлению функции $\Theta(x/R, Fo, Bi)$, где R — половина толщины или радиус тела, Fo — безразмерный критерий Фурье, Bi — безразмерный критерий Био, Θ — безразмерная температура. Величина Θ , изменяющаяся от нуля до единицы, представляет собой отношение:

$$\text{для нагревания тела } \Theta = (t_{ср} - t)/(t_{ср} - t_0), \quad (132)$$

$$\text{для охлаждения тела } \Theta_{ох} = (t - t_{ср})/(t_0 - t_{ср}), \quad (133)$$

где $t_{ср}$ — постоянная температура среды; t_0 — начальная температура тела; t — текущая температура в заданной точке тела.

В знаменателях (132) и (133) обозначен максимальный (в начале процесса) перепад температур, равный при нагревании тела $t_{ср} - t_0$, а при охлаждении $t_0 - t_{ср}$. В числителе даны переменная температура тела и по-

7. Критерии теплового, гигрометрического и гидродинамического подобия

Наименование критерия	Обозначение	Выражение	Физический смысл	Область применения
Фурье (теплообменный)	Fo	$\frac{a\tau}{R^2}$	Определяет связь между скоростью изменения температурного поля в твердом теле, физическими его характеристиками и размерами	Изучение нестационарных полей при нагреве или охлаждении тела (в виде определяющего критерия)
Фурье (массообменный)	Fo'	$\frac{a'\tau}{R^2}$	То же для поля влажности	То же для процесса сушки или увлажнения
Нуссельта (теплообменный)	Nu	$\frac{\alpha l}{\lambda}$	Определяет соотношение между теплопроводностью тела λ и теплообменом α в пограничном слое протяженностью l	В исследованиях внешнего переноса тепла в виде безразмерного коэффициента теплообмена
Нуссельта (массообменный)	Nu'	$\frac{\beta l}{D}$	Определяет соотношение между влажностью тела и его влагообменом в пограничном слое	В исследованиях внешнего влагообмена в виде безразмерного коэффициента влагообмена β
Био (теплообменный)	Bi	$\frac{\alpha R}{\lambda}$	Определяет соотношение между теплообменом на поверхности тела и его теплопроводностью	В исследованиях температурного поля (в виде определяющего критерия)
Био (массообменный)	Bi'	$\frac{\beta R}{D}$	Определяет соотношение между влагообменом на поверхности тела и его влажностью	То же в исследованиях внутренней влажностности
Температурный (при нагреве)	θ	$\frac{t_{cp} - t}{t_{cp} - t_0}$	Определяет степень нагрева тела в заданной точке	В расчетах нагрева тел
Температурный (при охлаждении)	$\theta_{ох}$	$\frac{t - t_{cp}}{t_0 - t_{cp}}$	Определяет степень охлаждения тела в заданной точке	В расчетах охлаждения тел
Рейнольдса	Re	$\frac{vd}{\nu}$	Определяет гидродинамику потока, показывая соотношение в нем сил инерции и внутреннего трения	В расчетах гидродинамики и переноса тепла вынужденным газовым потоком

стоящая среды на протяжении процесса: при нагревании $t_{ср} > t$, при охлаждении $t > t_{ср}$.

На рис. 52 нанесены кривые 1, 2, 3, 4 распределения температур по толщине $2R$ тела, последовательно зафиксированные во времени при нагревании (схемы а, б) и охлаждении (схема в).

Нагревание при $\alpha \rightarrow \infty$ материалов значительной толщины, когда $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} \rightarrow \infty$, осуществляется в гидрофобных жидкостях (проточном, каменноугольном масле, нагретом петролатуме и т. д.) насыщенным паром, а также контактированием материала с горячими металлическими поверхностями.

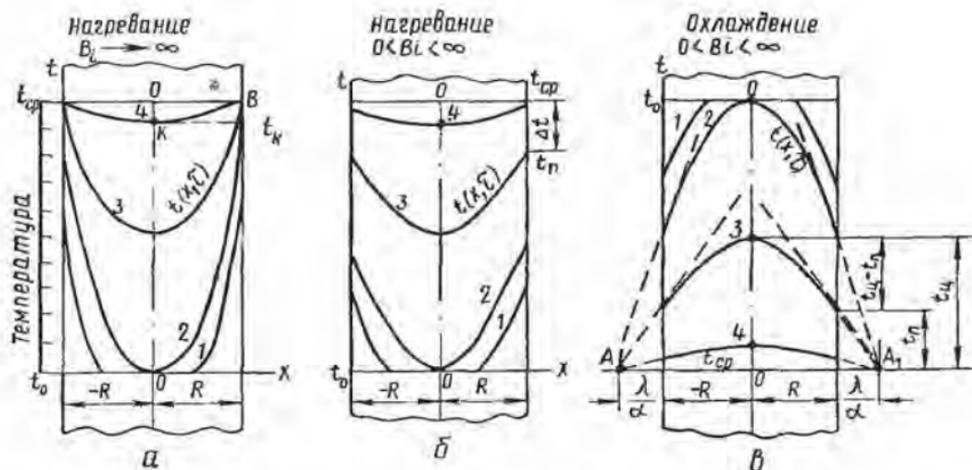


Рис. 52. Кривые последовательного 1, 2, 3, 4 распределения температур при двустороннем теплообмене плоского тела в условиях регулярного режима: а — нагревание при $Bi \rightarrow \infty$; б — нагревание при $0 < Bi < \infty$; в — охлаждение при $0 < Bi < \infty$

В таком процессе температура поверхности нагреваемого тела близка к температуре среды, поэтому у поверхности тела кривые 1, 2, 3, 4 примыкают к точке В (рис. 52, а) на линии $t_{ср}$.

Расчетами продолжительности нагревания пиломатериала предполагается получить требуемую температуру в центральной зоне, когда $x=0$, т. е. $x/R=0$. При этом задаются конечной разностью температур Δt среды и материала, т. е. $\Delta t = t_{ср} - t_k$ (см. рис. 52, а, точка К). Это условие учитывают значением Θ_k в конце нагревания. Например, при $t_{ср} = 80^\circ \text{C}$, $t_k = 74^\circ \text{C}$ и $t = 20^\circ \text{C}$ получим $\Theta_k = (80 - 74) / (80 - 20) = 0,1$.

Для достижения равенства температур $t_k = t_{ср}$ потребуется бесконечно большое время нагревания. Применительно к древесине на рис. 52, в отношение $\lambda/\alpha \approx 0,1/10 \approx 0,01$ м, т. е. 10 мм.

По диаграмме на рис. 53, а, показывающей зависимость $\Theta(Fo, x/R)$ [3], составлены простые графики $\Theta(Fo)$ (рис. 53, б) при $x=0$, т. е. для нагревания (или охлаждения) в центре сортимента (график справа — в полулогарифмической анаморфозе).

Метод расчета продолжительности нагревания пиломатериалов с известными R и a следующий. Задаются температурой среды t_{cp} и температурой t нагретой доски в средней плоскости. Затем определяют безразмерную температуру по (132) и по графику на рис. 53, б находят критерий Fo (см. табл. 7). Решив этот критерий относительно τ , получают искомую продолжительность нагревания сортамента:

$$\tau = \frac{FoR^2}{a}, \quad (134)$$

где R — радиус тела, м.

Определим продолжительность нагревания досок толщиной 80 мм ($R = 0,04$ м) до 76°C в средней плоскости при температуре среды 80°C ; коэффициент температуропроводности $a = 0,0005$ м²/ч (см. рис. 48), начальная температура древесины 10°C . Определим безразмерную температуру по (132):

$$\theta = (t_{cp} - t)/(t_{cp} - t_0) = (80 - 76)/(80 - 10) = 0,057.$$

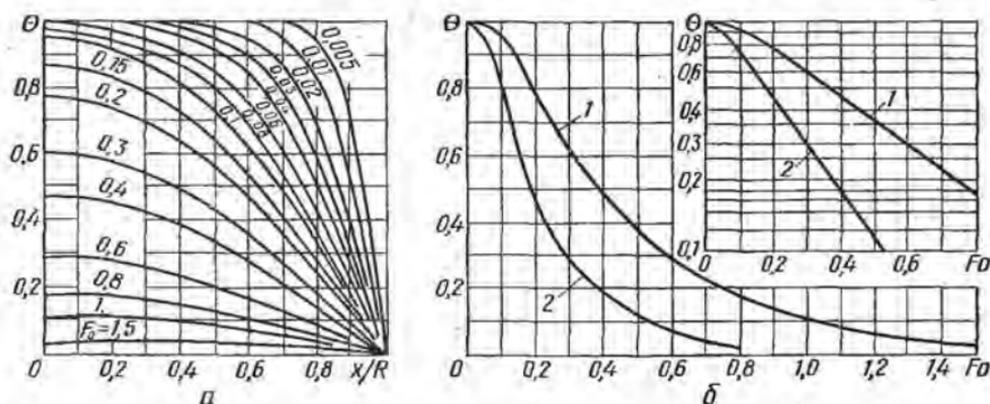


Рис. 53. Зависимость между критерием Фурье Fo и безразмерной температурой θ при нагревании:

а — при различных значениях x/R ; б — в средней плоскости пластины 1 или на оси цилиндра 2

По графику рис. 53, б найдем $Fo = 1,25$. Продолжительность нагревания доски

$$\tau = FoR^2/a = 1,25 \cdot 0,04^2/0,0005 = 4 \text{ ч.}$$

Продолжительность прогрева древесины в промежуточных точках по толщине доски рассчитывают по диаграмме рис. 53, а. При одинаковых R древесина на оси неограниченного цилиндра прогревается в 2 раза, а шара в 3 раза быстрее, чем в середине пластины.

Часто необходимо решить обратную задачу — выявить температуру t в середине пластины по продолжительности ее нагревания τ . Например, $R = 0,04$ м; $a = 0,0005$ м²/ч; $\tau = 4$ ч; $t_{cp} = 80^\circ\text{C}$; $t_0 = 10^\circ\text{C}$. Требуется найти t в середине пластины. Определим для этих условий значение критерия Фурье:

$$Fo = a\tau/R^2 = 0,0005 \cdot 4/0,04^2 = 1,25.$$

Затем по графику (см. рис. 53, б) установим, что критерию Фурье 1,25 соответствует безразмерная температура 0,057. Подставив это значение θ в (132), найдем $0,057 = (80 - t)/(80 - 10)$, или $t = 76^\circ\text{C}$.

В случае выявления температуры на оси нагреваемых узких досок (брусков) в качестве безразмерной температуры в последнем расчете принимают произведение безразмерных температур, вычисленных отдельно для толщины и для ширины сортифта. На рис. 54 приведена диаграмма [24] для графического расчета продолжительности нагревания сортифтов прямоугольного сечения с разным отношением ширины $Ш$ к толщине T . Верхняя кривая характеризует одностороннее нагревание бесконечной пластины. Влиянием кромок на продолжительность нагревания можно пренебречь, если $Ш/T > 3$.

Нагревание материала при коэффициенте теплообмена $\alpha < \infty$ воздухом, характеризующимся значением $\varphi < 1$. При этом в пограничном слое в виде

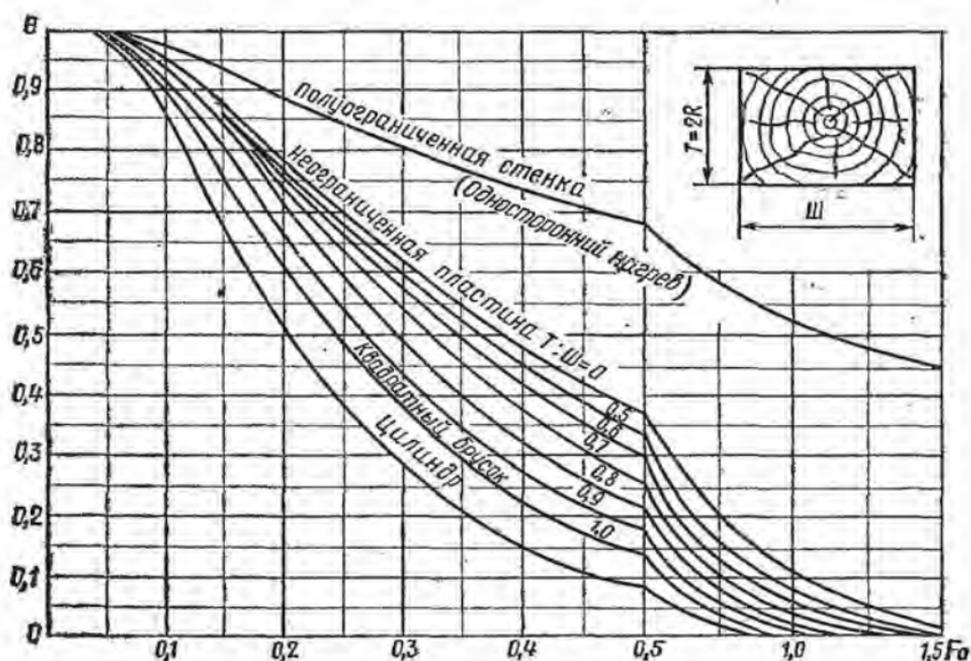


Рис. 54. Диаграмма для расчета нагревания досок, брусков и цилиндрических сортифтов - на их оси

элемента термического сопротивления возникает заметная разность температур Δt (см. рис. 52, б), поэтому $Bi < \infty$. Расчет такого нагревания сложнее расчета для $\alpha \rightarrow \infty$.

Величина α зависит от характера нагреваемой поверхности и гидродинамики омывания ее средой. Существует много расчетных формул для определения α . При естественной конвекции воздуха у вертикальной стенки коэффициент α для древесины можно принимать (при $\Delta t < 10^\circ \text{C}$):

$$\alpha = 3,5 + 0,093\Delta t \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 3,0 + 0,08\Delta t \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ \text{C}), \quad (135)$$

у горизонтальной стенки

$$\alpha = 3,3\sqrt[4]{\Delta t} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 2,8\sqrt[4]{\Delta t} \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ \text{C}), \quad (136)$$

где Δt — средняя разность температур между средой и телом.

При вынужденной конвекции пользуются следующими формулами:

при $v < 5$ м/с

$$\alpha = 6,2 + 4,2v \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} = 5,3 + 3,6v \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С)} \quad (137)$$

при $v > 5$ м/с

$$\alpha = 7,1v^{0,78} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} = 6,5v^{0,78} \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С)}, \quad (138)$$

где v — скорость воздуха относительно стенки, м/с.

В исследовательских работах коэффициент теплообмена α (без влагообмена) обычно находят из уравнения критерия Нуссельта (см. табл. 7):

$$Nu = AR^n, \quad (139)$$

где A и n — коэффициенты, зависящие от рода материала и величины критерия Рейнольдса Re [29]:

при $Re = 200 \dots 25000$ $A = 0,385$ и $n = 0,57$;

„ $Re = 25000 \dots 70000$ $A = 0,102$ и $n = 0,73$;

„ $Re = 70000 \dots 315000$ $A = 0,025$ и $n = 0,90$.

На диаграмме в логарифмических координатах (на логарифмической бумаге) это уравнение покажет прямую. Действительно, логарифмируя его, получим $\lg Nu = \lg A + n \lg Re$, или применительно к логарифмической анаморфозе уравнение прямой $y = B + nx$. Значение n представляет тангенс угла α наклона прямой к оси абсцисс. Постоянная $A = Nu/Re^n$ удовлетворяет любой точке прямой. Затем из соотношения (см. табл. 7) $Nu = \alpha l / \lambda$, где l (м) — определяющий размер для пути воздуха по материалу, устанавливают α .

На полулогарифмической бумаге прямая описывается уравнениями (29), (73), (180), (183) и др. или в общем виде $w = ae^\tau = b10^\tau$, т. е. $\tau = \ln(w/a) = -\lg(w/b)$. Здесь: a, b — постоянные коэффициенты; w, τ — переменные.

В приближенных расчетах для теплообмена единичных образцов пиломатериалов с воздухом можно использовать простое соотношение [29]:

$$Nu = 0,6Re^{0,5}. \quad (140)$$

Продолжительность нагревания или охлаждения пластин, в частности досок, в газообразной среде при $Bi < \infty$ рассчитывают по универсальной номограмме Д. В. Будрина (рис. 55). На оси абсцисс нанесена шкала критерия Фурье, на оси ординат — безразмерная температура, а в поле диаграммы — критерий Био. Пунктиром показана линия для цилиндра, а точками — для шара при $Bi = \infty$.

Пользование диаграммой поясним примером. Допустим, температура доски до нагревания 10°С , после нагревания в середине 70°С , температура газообразной среды 80°С , толщина материала $T = 60$ мм, или $R = 0,03$ м, теплопроводность древесины $\lambda = 0,21$ Вт/(м $^2 \cdot$ °С) [0,18 ккал/(м \cdot ч \cdot °С)], коэффициент теплообмена $\alpha = 7$ Вт/(м $^2 \cdot$ °С) [6 ккал/(м $^2 \cdot$ ч \cdot °С)], коэффициент температуропроводности $a = 0,0005$ м 2 /ч. Требуется определить продолжительность нагревания доски.

Безразмерная температура по (132) равна:

$$\Theta = (t_{\text{ср}} - t) / (t_{\text{ср}} - t_0) = (80 - 70) / (80 - 10) = 0,14.$$

Критерий Био

$$Bi = \alpha R / \lambda = 7 \cdot 0,03 / 0,21 = 1,$$

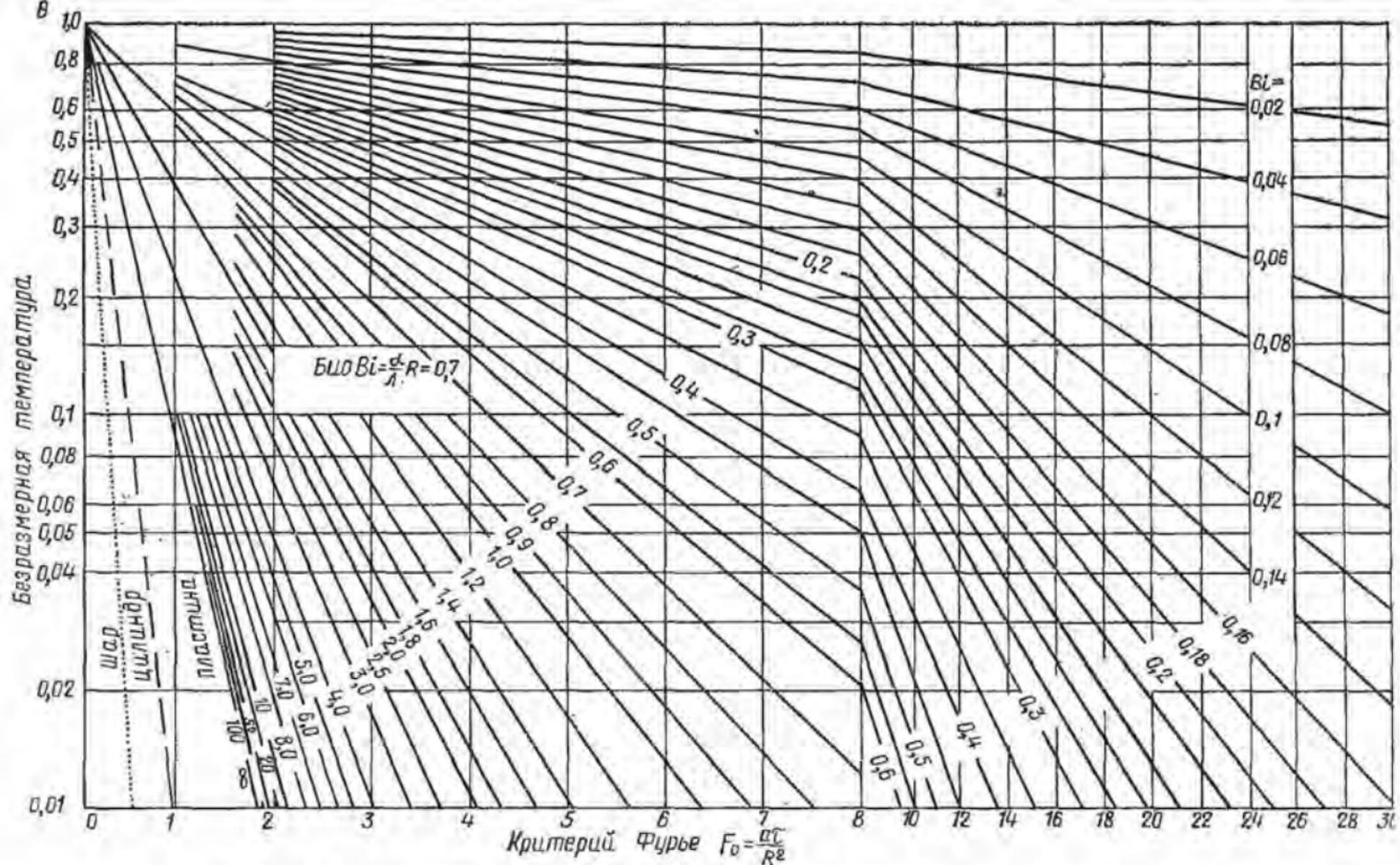


Рис. 55. Графическая зависимость $Fo(\theta, Bi)$ для середины неограниченной пластины

На оси ординат найдем $\Theta=0,14$ и, перемещаясь по горизонтали до наклонной линии $Bi=1$, отсчитаем внизу $Fo=2,8$. Следовательно, продолжительность нагревания доски

$$\tau = FoR^2/a = (2,8 \cdot 0,03^2)/0,0005 = 5 \text{ ч.}$$

Для сопоставления рассмотрим аналогичный пример, но при нагревании материала в гидрофобной жидкости или насыщенным паром, когда $\alpha=\infty$ и, следовательно, $Bi=\infty$. Тогда по рис. 53, б $Fo=0,88$ и отсюда $\tau=1,58$ ч, т. е. в 3,2 раза меньше. Такое влияние на продолжительность нагревания пиломатериалов при $T=60$ мм условий внешнего теплообмена.

В случае охлаждения плоских сортиментов для расчетов используют диаграмму на рис. 55. Например, при охлаждении отмеченного сортимента от начальной температуры 80°C до 20°C при температуре среды 13°C получим безразмерную температуру $\Theta_{0x}=(20-13)/(80-13)=0,09$. По диаграмме для $\Theta_{0x}=0,09$ и $Bi=1$ находим $Fo=3,4$. Следовательно, продолжительность охлаждения доски

$$\tau = FoR^2/a = 3,4 \cdot 0,03^2/0,0005 = 6,1 \text{ ч.}$$

Обычно материал нагревается воздухом с более высокой насыщенностью пара ϕ , чем охлаждается. При охлаждении сортимента воздух подогрывается древесиной и граничное значение воздуха падает, а при нагревании материала, наоборот, воздух охлаждается и его ϕ повышается. Поэтому при нагревании материала коэффициент теплообмена больше и процесс короче, чем при его охлаждении (не считая кондуктивного, а также испарительного охлаждения).

Расход тепла и его баланс на нагревание 1 кг влажной древесины складывается из расходов тепла на нагревание древесной массы, влаги, льда и на плавление льда. На рис. 56 представлена диаграмма для быстрого и достаточно точного графического нахождения указанных составляющих расхода тепла.

На оси ординат указана влажность древесины (49); на оси абсцисс теплосодержание; нулевое его значение соответствует нулевой температуре ($^\circ\text{C}$) (вертикаль *ОНТ*). Левее этой температуры теплосодержание будет отрицательным, но оно арифметически суммируется с положительной теплотой (аналогично расчету энтальпии на *Id*-диаграмме).

Отрезок *AB* соответствует теплоте подогрева самой древесины и льда и теплоте, израсходованной на плавление льда, получившегося из гигроскопической жидкости от заданной начальной температуры (в точке *A* показано -40°C) до 0°C для 1 кг влажной древесины. Отрезок *BC* характеризует теплоту плавления льда, *CE* — теплоту нагревания влажной древесины от 0°C до требуемой температуры (например в точке *E* до 60°C).

Количество незамерзшей воды во влажной древесине в гигроскопической зоне *КНО* (ниже линии *НК*) зависит от величины ее отрицательной температуры [24]:

$$\Delta w = 12 + 18e^{0,057(t+2)} \% \quad (141)$$

Линия *УН* предела гигроскопичности отклоняется от горизонтали вследствие увеличения значений этого предела с понижением положительной температуры древесины. Правее линии *КНТ* вся влага в древесине будет жид-

кой, а в области левее KHK — в виде льда. В древесине, характеризуемой точкой A , содержится $w_A - w_K$ льда и w_K жидкости, а в точке B соответственно $w_B - w_H$ льда и w_H жидкости. В области ниже $УHK$ влага жидкая, связанная, а выше — влага свободная.

Поясним на примере пользование диаграммой. Допустим, требуется определить расход тепла на нагревание 1 м^3 сосновой древесины влажностью 60% от -40°C до $+60^\circ\text{C}$. По диаграмме найдем расход тепла на нагревание 1 кг влажной древесины по сумме отрезков $AC + CE = 147 + 167 = 314 \text{ кДж/кг}$ ($35 + 40 = 75 \text{ ккал/кг}$). По диаграмме на рис. 45 установим,

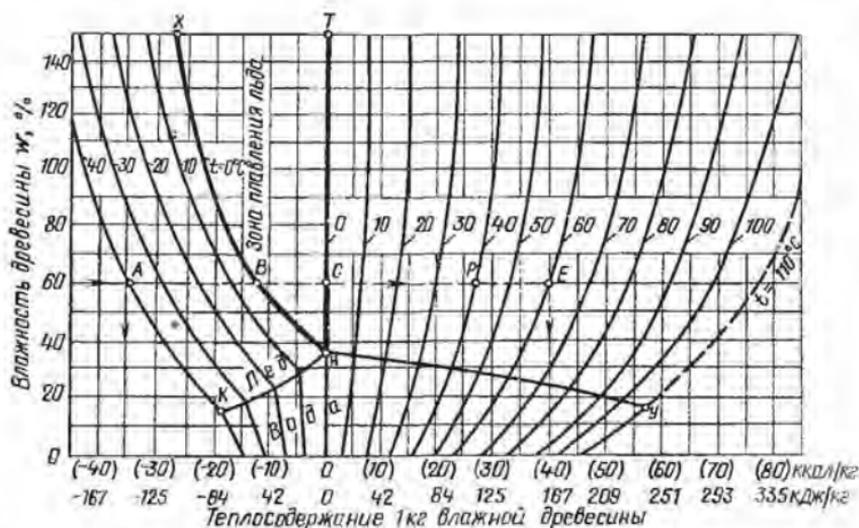


Рис. 56. Диаграмма для определения расхода тепла на нагревание 1 кг древесины с влагой

что плотность древесины сосны при влажности 60% равна 650 кг/м^3 . Следовательно, искомый расход тепла $314 \cdot 650 = 204 \text{ МДж/м}^3$ (49 000 ккал/м^3).

Нагревание мерзлой древесины исследовалось многими авторами. Сложность задачи — в трудности раскрытия переменного во времени температурного поля в условиях фазового превращения влаги. Основная цель исследований — установление метода расчета и продолжительности процесса.

Диаграмма (см. рис. 56) удобна для анализа баланса тепла при различных значениях t_0 , t , w нагреваемой древесины. Она позволяет также уточнить методические положения, относящиеся к расчету нагревания древесины, содержащей замерзшую влагу. Рассмотрев диаграмму, можно сделать следующие выводы:

1) при низкой влажности древесины (менее 20%) в ней практически нет льда и никаких расчетов по ее оттаиванию проводить не следует;

2) при обычной влажности сырых пиломатериалов $60-80\%$, нагреваемых от средней температуры -20°C до $+75^\circ\text{C}$, расход тепла на плавление льда около 67 кДж (16 ккал) при полном расходе тепла 335 кДж (80 ккал) на 1 кг влажной древесины, т. е. около 20% от общей затраты тепла на ее нагревание;

3) при обычной влажности сырой древесины до 60—80% расход тепла на подогрев мерзлой древесины (например, по отрезку AB) примерно соответствует расходу тепла на подогрев древесины от 0°C до такой же, но положительной температуры (например, 40°C — отрезок PC).

В более точных расчетах можно учитывать, что при подогреве мерзлой древесины (без таяния льда) расходуется несколько меньше тепла, чем при нагревании ее без льда при той же ее плотности и на ту же разность температур. Поэтому изотермы в левой зоне диаграммы расположены теснее, чем в правой. Одна из причин этого в том, что теплоемкость льда в 2 раза меньше, чем воды.

Кривые температур по толщине мерзлой нагреваемой воздухом бесконечной пластины изображены на рис. 57. В период оттаивания температурные линии 1, 2 приобретают излом. Нагрев поверхностных слоев пластины можно рассматривать как процесс с внутренним отрицательным источником тепла. При этом в возрастающем по толщине оттаивающем слое (рис. 57, а, б) этот процесс близок к стационарному. Градиенты температур у поверхности пластины, передающей тепло внутрь, в начале нагревания и на протяжении всего процесса (кривые 1, 2, 3, 4 на рис. 57, в) будут близки к градиентам температур в нагреваемых пластинах без оттаивания льда (рис. 57, б). Аналогичными будут, следовательно, и плотности тепловых потоков (128).

Продолжительность нагревания мерзлой древесины перед искусственной сушкой определяют, как и продолжительность нагревания незамерзшей древесины (134) при той же теплоотдаче. Дополнительное время на подвод тепла для плавления льда можно принять на основании изложенного пропорциональным требуемому на это количеству тепла q_n , исходя из теплового баланса процесса.

Расчетная продолжительность оттаивания и нагревания древесины с учетом диаграммы (см. рис. 56) определится графоаналитическим методом:

$$\tau_1 = \frac{FoR^2}{a} \cdot \frac{AE}{AE - CB} = \frac{FoR^2q}{a(q - q_n)} \quad (142)$$

где q — полный расход тепла на оттаивание и нагревание древесины.

Например, в случае оттаивания и нагревания досок толщиной 60 мм, влажностью 60% от -40 до $+60^\circ\text{C}$ в условиях температуры среды 65°C величина $\theta = (65 - 60)/(65 + 40) = 0,048$. При заданном значении $Bi = 1$ (см. рис. 55) $Fo = 4,2$. Тогда продолжительность полного оттаивания и последующего нагревания досок

$$\tau_1 = \frac{FoR^2q}{a(q - q_n)} = \frac{4,2 \cdot 0,03^2 \cdot 75}{0,0005(75 - 11)} = 8,9 \text{ ч.}$$

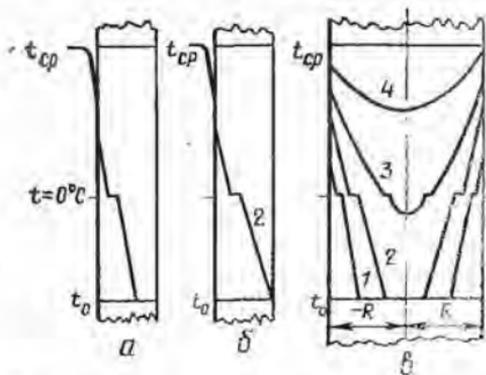


Рис. 57. Температурные кривые по толщине размораживаемых досок

Продолжительность только нагревания этих досок при тех же начальных и граничных условиях (величины a здесь близки между собой в среднем за весь процесс):

$$\tau = F_0 R^2 / a = 4,2 \cdot 0,03^2 / 0,0005 = 7,6 \text{ ч.}$$

т. е. $\tau = 0,85\tau_1$. Как видно, увеличение продолжительности процесса из-за плавления льда сравнительно небольшое.

30. ИСПАРЕНИЕ ВОДЫ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Закономерности испарения воды со свободной поверхности определяются физическими условиями на границе раздела двух фаз: воздух — вода. Многочисленными исследованиями установлено, что скорость испарения воды в воздух пропорциональна разности давлений водяного пара у самой поверхности воды p_n и в окружающем воздухе p_n . Давление пара у поверхности воды соответствует его давлению в состоянии насыщения p_n (см. табл. 3, графа справа) при температуре воды. Давление пара p_n в воздухе удобно определять по Id -диаграмме; его предельное значение для расчета нормальных процессов сушки пиломатериалов до 60 кПа (0,6 бар).

Интенсивность испарения I кг/(м²·ч) воды при небольших отклонениях давлений по сравнению с барометрическим можно вычислять по приближенной формуле Дальтона:

$$I = c(p_n - p_n), \quad (143)$$

где c — коэффициент испарения, учитывающий скорость v (м/с) воздуха и его направление у поверхности испаряемой воды.

Разность $p_n - p_n$ — потенциал испарения; его определение связано с трудностями. Удобнее представить его в виде потенциала сушки, т. е. психрометрической разности $\Delta_t = t - t_m$, непосредственно отсчитываемой по показанию психрометра. С учетом (34) $p_n - p_n = \Delta_t (65 - 0,0006 p_n)$ Па [$\Delta_t (6,5 - 0,0006 p_n)$ мм вод. ст.] можно предложить метод определения и контроля (в частности, автоматического) интенсивности испарения воды, используя действительное в различных производственных условиях протекание этого процесса и применяя в качестве датчика непосредственно баллон мокрого термометра психрометра (в том числе термометров контактного, сопротивления и др.). При этом моделируется фактическое испарение влаги в реальном контролируемом состоянии воздуха. Подставив значение $p_n - p_n$ [Па (мм вод. ст.)] в формулу Дальтона, получим

$$I = c_1 \Delta_t (65 - 0,0006 p_n) = [c \Delta_t (6,5 - 0,0006 p_n)] \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}. \quad (144)$$

В этой формуле определяющим параметром интенсивности испарения I воды является Δ_t . При параллельном направлении воздушного потока к испаряемой водной поверхности и его тем-

пературе в диапазоне 60—250° С коэффициент c приблизительно равен

$$c = 0,0017 + 0,0013v. \quad (145)$$

$$B(144) c_1 = 0,1c$$

При направлении потока воздуха перпендикулярном к поверхности воды интенсивность испарения удваивается. Более точные значения коэффициента c можно получить при учете тепло- и массообменных критериев подобия и скорости диффузии пара в воздухе.

Пример. Определить скорость адиабатного испарения воды, нагретой до 66° С воздухом с температурой 84° С и психрометрической разностью $\Delta t = 18^\circ \text{С}$ при движении воздуха со скоростью $v = 2$ м/с параллельно поверхности воды; давление пара по Id -диаграмме $p_n = 25\,500$ Па (2600 мм вод. ст.). Коэффициент $c = 0,0017 + 0,0013 \cdot 2 = 0,0043$. Интенсивность испарения воды $H = 0,00043 \cdot 18(65 - 0,0006 \cdot 25\,500) = [0,0775(6,5 - 0,0006 \cdot 2600)] = 0,385$ кг/(м²·с).

31. ИСПАРЕНИЕ ВЛАГИ С ПОВЕРХНОСТИ ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

При влажности испаряющей поверхности материала ниже предела гигроскопичности давление водяного пара на поверхности древесины p_d уменьшается по сравнению с давлением пара на поверхности воды p_n той же температуры. Это понижение тем заметнее, чем ниже влажность поверхности материала. Из уравнений (3) и (102) для области молекулярной сорбции древесины, когда $\varphi < 0,5$, получим

$$\varphi = p_n/p_n = (\omega'_p - \omega_0)/B, \quad (146)$$

$$\text{или } p_n = p_d = p_n(\omega'_p - \omega_0)/B = a(\omega_p - \omega_0), \quad (147)$$

где $B = 0,72 [29,5 - (T/100)^2]$, т. е. зависит от температуры; a — коэффициент пропорциональности, равный p_n/B .

Таким образом, при неизменной температуре, когда $\omega_0 = \text{const}$ (103) и $B = \text{const}$ в состоянии равновесия давление p_d пара на поверхности древесины пропорционально значению ее равновесной влажности ω_p [прямые $\omega_p(\varphi)$ в левой части на рис. 29].

При влажности в области ω'_p , характеризующейся капиллярной конденсацией влаги, согласно (104)

$$\varphi = 1,21 - C/\omega''_p. \quad (148)$$

В состоянии равновесия в области $\varphi > 0,5$ (справа на рис. 29) значение C при неизменной температуре постоянное

$$C = 0,512[21,7 - (T/100)^2]. \quad (149)$$

Согласно (3) и (148) при отсутствии тепло- и влагообмена

$$p_n = p_d = p_n [1,21 - (C/w_p'')], \quad (150)$$

Следовательно, в области капиллярной конденсации давление пара в древесине p_d в изотермических условиях также определяется ее равновесной влажностью (но по гиперболической кривой), увеличиваясь с повышением влажности w_p'' и наоборот.

Процесс испарения влаги из древесины как гигроскопического материала удобно изучать с помощью Id -диаграммы, на которой в верхней части нанесена шкала давлений пара p_n , а в поле диаграммы показаны линии равновесной влажности древесины (см. рис. 31).

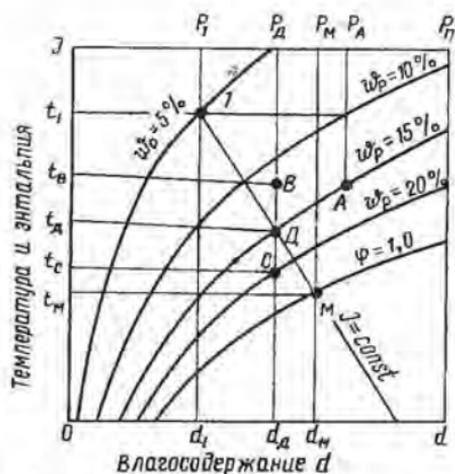


Рис. 58. Нанесение на Idw_p -диаграмму (см. рис. 31) параметров тепло- и влагообмена между воздухом и гигроскопическим материалом

Для начального периода сушки влажного материала, когда испаряется свободная влага, применяют (143) для расчета испарения воды с открытой поверхности. Разность давления пара $p_m - p_1$ определится из параметров пара в воздухе в точке I по значениям t_1 и t_m воздуха и в точке M по величине t_m на линии $\varphi = 1$ (рис. 58).

Давление водяного пара на поверхности гигроскопической древесины определяется ее температурой и локальной влажностью.

Направление процесса (сорбция или десорбция) и его скорость можно установить по температуре t_1 и давлению пара p_1 в воздухе и по температуре t_d и равновесной влажности древесины w_p на поверхности материала.

Пусть точка D (см. рис. 58) характеризует температуру t_d и равновесную влажность w_p поверхности древесины и соответствующее давление пара p_d . Если точка B или C состояния окружающего древесину воздуха не совпадает с точкой D , но находится на той же вертикали $d = const$, древесина не будет ни испарять влагу, ни сорбировать ее, поскольку $p_n = p_d$. Однако в тепловом отношении вследствие разности температур $t - t_d$ такое состояние неустойчиво.

Анализ этого состояния имеет существенное практическое значение. Так, во время прогрева материала перед сушкой и при охлаждении его после сушки стремятся избежать как

испарения влаги из материала, так и его увлажнения. Это возможно, как видно из рис. 58, если при нанесении параметров воздуха и древесины на $I d w$ -диаграмму будет соблюдено условие $p_n = p_d$ у поверхности древесины.

Наметим точку состояния воздуха A справа от точки D , когда давление пара p_A в воздухе будет больше, чем на поверхности древесины; в этих условиях пар будет переходить на поверхность древесины, увлажняя ее. Такой процесс будет продолжаться до достижения равновесия давлений $p_A = p_d$. Точки D и A могут находиться на общей кривой w_p , как показано на рис. 58. Равновесие давлений пара в воздухе и на поверхности древесины будет достигнуто, когда точки, характеризующие состояние воздуха A и древесины D совместятся на $I d w$ -диаграмме. Если точка состояния воздуха I находится слева от точки D , поверхность материала будет отдавать влагу.

Процесс испарения гигроскопической влаги будет отклоняться от линии $\tau = \text{const}$ (см. рис. 9, б), приближаясь к линии $I = \text{const}$. Поэтому, если точки D и I (см. рис. 58) находятся на общей линии $I = \text{const}$, процесс может быть адиабатным, стационарным для данной влажности поверхности древесины.

Известно, что над истинным и коллоидным растворами давление пара ниже, чем над чистым растворителем, в частности над водой. Поэтому раствор высыхает медленнее и кипит при более высокой температуре, чем растворитель. Концентрация раствора при испарении растворителя постепенно повышается, что еще более затрудняет испарение. В этом отношении между испарением влаги из древесины и испарением растворителя из раствора может быть проведена аналогия. Рассмотренное относится и к испарению влаги из коллоидов. Древесина представляет собой ограниченно набухающий коллоид капиллярнопористой структуры.

Кипение влаги в древесине и сушка ее в атмосферных условиях выпариванием, когда нет потребности в воздухе как поглотителе выделяющегося пара, возможно лишь при давлении пара на поверхности древесины выше барометрического. Это условие справедливо для выпаривания как свободной, так и гигроскопической влаги; в последнем случае температура влаги должна быть выше 100°C .

При влагообмене в вакууме влага как свободная, так и гигроскопическая будет испаряться из материала при $p_d > p_n$ и выпариваться из него при $p_d > p_n$.

32. ДВИЖЕНИЕ ВЛАГИ В ДРЕВЕСИНЕ (ДИНАМИКА СУШКИ)

Физические явления динамики сушки

Внутри высушиваемого материала влага может перемещаться в виде жидкости (свободная влага), в смешанном виде — жидкость вместе с паром, жидкость и пар последовательно

(в стенках клеток жидкость, а в полостях пар, с попеременным при передвижении испарением и конденсацией) и, наконец, только в виде пара.

На рис. 59, а приведена кривая переменной влагопроводности древесины бука [7]. При повышающейся влажности древесины вблизи предела гигроскопичности значение этой влагопроводности достигает максимума, затем падает, а при влажности выше 100% резко повышается.

На рис. 59, б показана закономерность относительного количества капиллярно перемещаемой в радиальном направлении в древесине бука жидкости Ж к суммарно перемещаемому

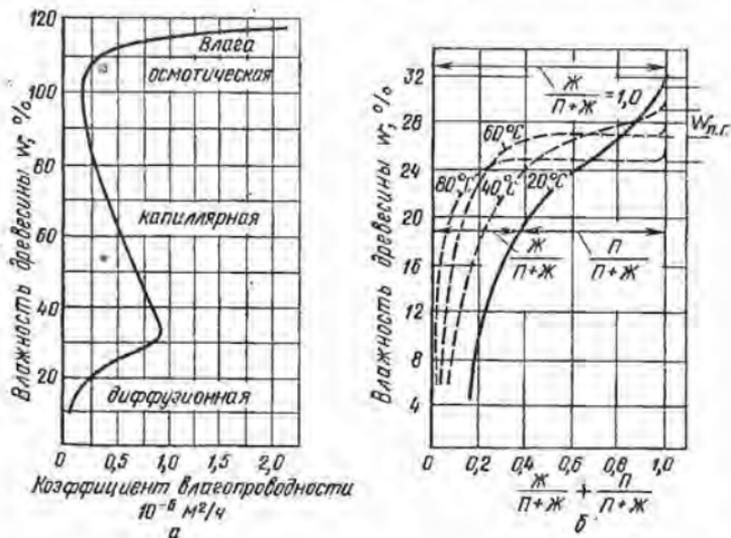


Рис. 59. Кривые влагопроводности древесины бука в радиальном направлении:

а — кривая коэффициента влагопроводности; б — кривые потоков влаги в виде; п — пара, ж — жидкости — по отношению к суммарному п+ж потоку влаги

количеству влаги в виде пара и жидкости П+Ж при постоянных температурах 20, 40, 60 и 80°С. Чем выше температура и ниже влажность древесины, тем в большем количестве влага перемещается в виде пара; ее испарение происходит в толще материала с постепенным заглублением зоны испарения [2].

Движущими силами перемещения влаги могут быть гравитация (при радиусе капилляров более 10^{-2} мм), капиллярное давление, осмотическое давление, электроосмос, давление, создаваемое образующимся в древесине паром, механическое воздействие, диффузия, эффузия, термодиффузия и др. Отдельно рассматриваемые потоки влаги, возникающие под действием различных сил, могут накладываться или, наоборот, быть направленными противоположно, поперечно и т. д. один к другому.

На движение влаги влияет также неодинаковая микро- и макроструктура древесины различных пород или в разных частях ствола, плотность, а также направление вектора основного потока влаги к главным структурным направлениям ствола дерева и т. д. Таким образом, виды влаги, движущие силы и закономерности ее передвижения в древесине многообразны и сложны.

Основные закономерности передвижения влаги в древесине

Для сушки пиломатериалов особенно перспективно стимулирующее воздействие на поток свободной влаги. Жидкость в пористом теле перемещается в виде фильтрационного движения под действием силы тяжести, гидростатического давления (молярный или конвективный перенос) и путем капиллярного всасывания. Величина капиллярного давления для вогнутого мениска смачивающей жидкости радиусом r определяется по соотношению Лапласа:

$$p_{\sigma} = -2\sigma/r, \quad (151)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; его величина для воды с повышением температуры уменьшается по линейному закону [30]:

$$\sigma = 0,076(1 - 0,0022t) \text{ Дж/м}^2 \text{ [} 76(1 - 0,0022t) \text{ эрг/см}^2 \text{]}. \quad (152)$$

Разность капиллярных давлений Δp при неодинаковых радиусах r_1 и r_2 по длине капилляра

$$\Delta p = -2\sigma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (153)$$

создает движение жидкости в капилляре.

Скорость v жидкости в капилляре радиусом r рассчитывают по формуле Пуазейля:

$$v = \frac{\pi r^4}{8\mu} \cdot \frac{p_1 - p_2}{l}, \quad (154)$$

где $(p_1 - p_2)/l$ — градиент давления по длине капилляра; μ — коэффициент вязкости жидкости (разделив его на плотность, получают кинематическую вязкость ν). Этот коэффициент [табл. 7, (139)] зависит от температуры и составляет для воды [30]:

Температура, °С	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120
Кинематическая вязкость ν 10^{-4} м ² /с	1,79	1,31	1,00	0,80	0,65	0,55	0,47	0,36	0,28	0,23

При сушке древесины влага, находящаяся в капиллярах $r < 10^{-3}$ см, удаляется сначала из более крупных, а затем из меньших по радиусу капилляров. Таким образом, с понижением влажности древесины капиллярное давление (151) постепенно возрастает. Поэтому поток влаги i_k , перемещающейся в направлении градиента влажности dw/dx , можно приближенно принять:

$$i_k = -D_k \frac{dw}{dx}, \quad (155)$$

где D_k — коэффициент капиллярной влагопроводности.

Понятие о капиллярной (в основном при влажности выше предела гигроскопичности) и диффузионной влагопроводности (ниже $w_{п.г}$), относится к процессам сушки с температурами, наблюдаемыми в сушильных камерах, вплоть до температуры кипения воды.

К древесине, как к коллоидному телу, можно применить закон Фика, по которому при наличии градиента гигроскопической влажности возникает во времени τ диффузионный поток влаги i в направлении координаты x :

$$i = \frac{dw}{d\tau} = -D \frac{dw}{dx}, \quad (156)$$

где D — коэффициент диффузионной влагопроводности.

Таким образом, потенциалом переноса влаги в древесине при изотермических условиях и $r < 10^{-2}$ мм можно принять градиент влажности с различными коэффициентами влагопроводности, зависящими от значений влажности древесины, ее температуры, направления потока влаги, плотности древесины, ее реологических свойств и других факторов.

Влиянием термовлагопроводности на перенос влаги в древесине при средних и особенно при повышенных температурах процесса сушки можно пренебречь (рис. 60). Тогда для одномерной задачи можно применить линейное (с постоянными коэффициентами) дифференциальное уравнение, аналогичное в основной части уравнению Фурье (131) для теплопроводности:

$$-\frac{\partial w}{\partial \tau} = D_k \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_m \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \quad (157)$$

где D_k , D и D_m — коэффициенты капиллярной, диффузионной и молярной влагопроводности, которые для выделяемых интервалов времени процесса сушки принимаются постоянными; x — координата по толщине бесконечной пластины.

Левая часть уравнения представляет собой скорость изменения локальной влажности w во времени τ , т. е. характеризует кривую сушки; первый член правой части — вторую производную распределения влажности по толщине материала с учетом

капиллярной влажопроводности; второй член — диффузионную влажопроводность; третий — молярную влажопроводность (когда температура древесины при атмосферном давлении прибли-

Рис. 60. Кривые зависимости термоградиентного коэффициента δ древесины сосны от ее температуры t .

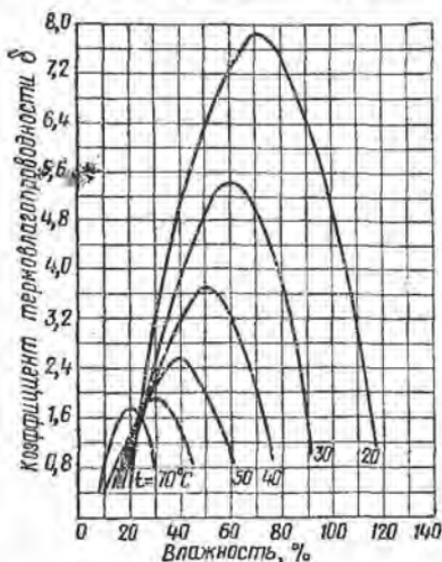
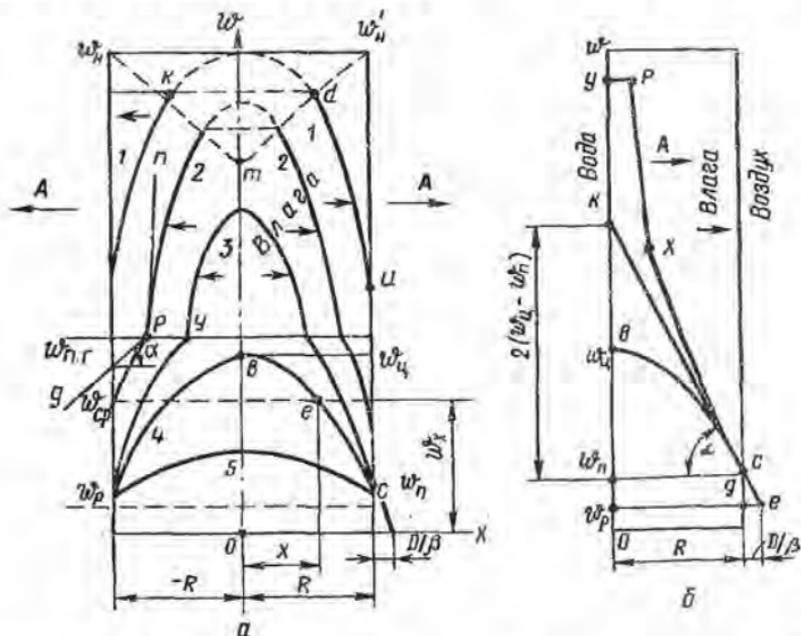


Рис. 61. Распределение влажности по толщине материала во время сушки:

a — кривые влажности в различные периоды (1, 2, 3, 4, 5) сушки материала; *b* — градиент влажности $(\kappa - w_n)/R$ у поверхности материала в точке *c*, а также линия y/Px градиента влажности при стационарном потоке влаги



жается к 100°C или превышает эту температуру). Обычно это уравнение рассматривают в виде

$$-\frac{\partial w}{\partial t} = D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad (158)$$

с учетом лишь диффузионной влажопроводности, что относится

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 следующий 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]:

$$w_x = w_{\text{ц}} - (x/R)^2(w_{\text{ц}} - w_{\text{п}}) = w_{\text{ц}}(x/R)^2\Delta_w, \quad (159)$$

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

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

Так как площадь параболы составляет $2/3$ 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 $w_{\text{ц}}$ и минимальной на ее поверхности $w_{\text{п}}$ (кривая 4):

$$w = \frac{2}{3}(w_{\text{ц}} - w_{\text{п}}) + w_{\text{п}}, \quad (160)$$

как это показано на рис. 61, а пунктирной горизонталью $w_{\text{ср}}$.

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

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

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

$$w_{\text{ц}} = \frac{3}{2}w - \frac{1}{2}w_{\text{п}} = \frac{1}{2}(3w - w_{\text{п}}). \quad (162)$$

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

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

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 электровлажномером 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 $2(w_u - w_n)$, отнесенному 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, а), можно вычислить коэффициент диффузионной влагопроводности у поверхности материала, $m^2/ч$:

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

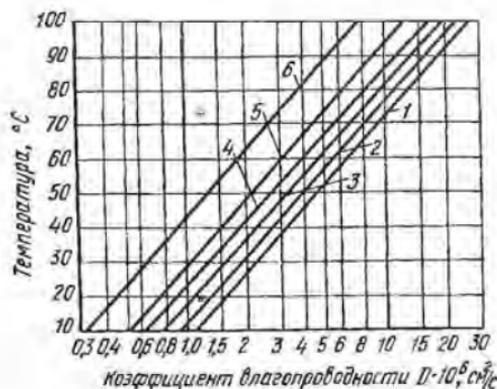


Рис. 62. Средние коэффициенты диффузионной влагопроводности древесины:

1 — сосны; 2 — ели; 3 — березы; 4 — бука; 5 — лиственницы; 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 ($m^2/ч$) капиллярной влагопроводности можно определить так же, как и коэффициент диффузионной влагопроводности (155) и (156), но в начальный период сушки — в точке x_u , расположенной вблизи линии $\omega_{п.г.}$ на кривой I (см. 61, а) и являющейся частью ud параболы:

$$D_k = iR/[2(\omega_u - \omega_n)]. \quad (168)$$

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, а), 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_d , 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 пластъ доски будет непрерывно смачиваться водой, а вторая испарять влагу. Наклон отрезка Px к горизонтали покажет большую величину градиента влажности (при передвижении свободной влаги), чем наклон отрезка $xс$ (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 $w_n - m - w_n$ 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 желательнее 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 $w_{п.г.}$, неправильно распространять относящиеся к области диффузионной влагопроводности постоянство коэффициента влагопроводности, квадратическую зависимость продолжительности сушки с уменьшением толщины сортифта, 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 производствах 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 τ_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 ϕ 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 сортов, 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 $\omega = \text{const}$, 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 ω путем ее графического дифференцирования может быть построена для участка CD аналогичная по форме кривая скорости сушки

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

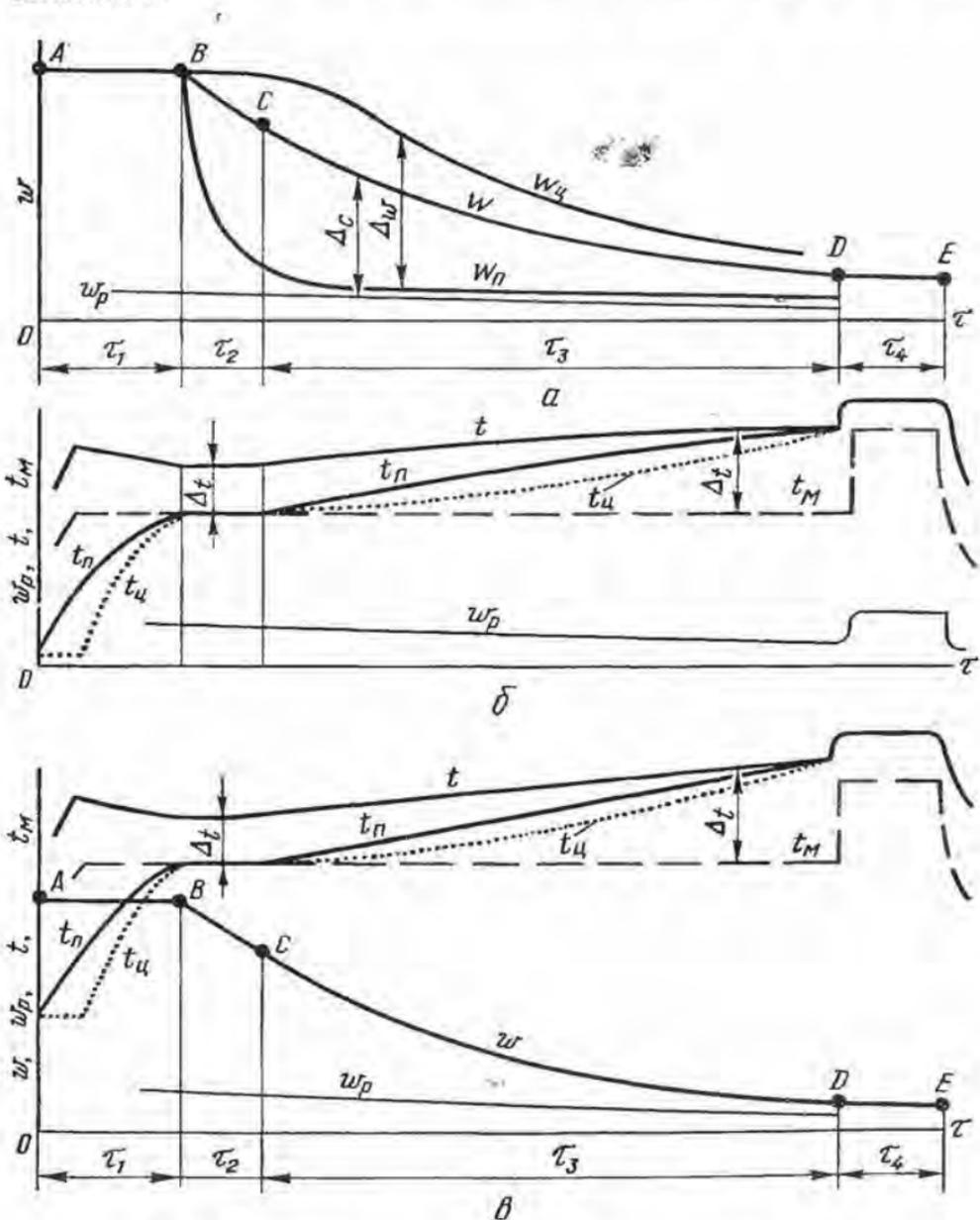


Рис. 63. Графическое изображение процессов сушки:

а — кривые сушки и равновесная влажность воздуха w_p ; б — температурные кривые; в — совмещенное нанесение кривых; t — температура по сухому термометру; t_M (пунктиром) — температура по мокрому термометру психрометра; $t_{п}$ — температура поверхности материала; $t_{ц}$ (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 теплопроводности 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 теплопроводности; $H = \beta/D$, 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 теплопроводности 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 теплопроводностью материала D . Продолжительность сушки при $D = \text{const}$ обратно пропорциональна квадрату толщины материала. Это уравнение применимо к интенсивной сушке тонких 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 теплопроводность 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 горизонталям.

На продолжительность сушки влияет ряд факторов. Практически можно считать, что при штабельном (шириной 1,8 м) высушивании обычных пиломатериалов в камерах со скоростной побудительной циркуляцией воздуха продолжительность сушки в среднем пропорциональна полуторной 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 Δt и других факторов.

Уравнение кривой сушки

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

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

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

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 $w_n < w_{н.г.}$. 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 начнется 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 : $120 = c1 \cdot \lg 5 = 0,699 c$; т. е. $c=172$.

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

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

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

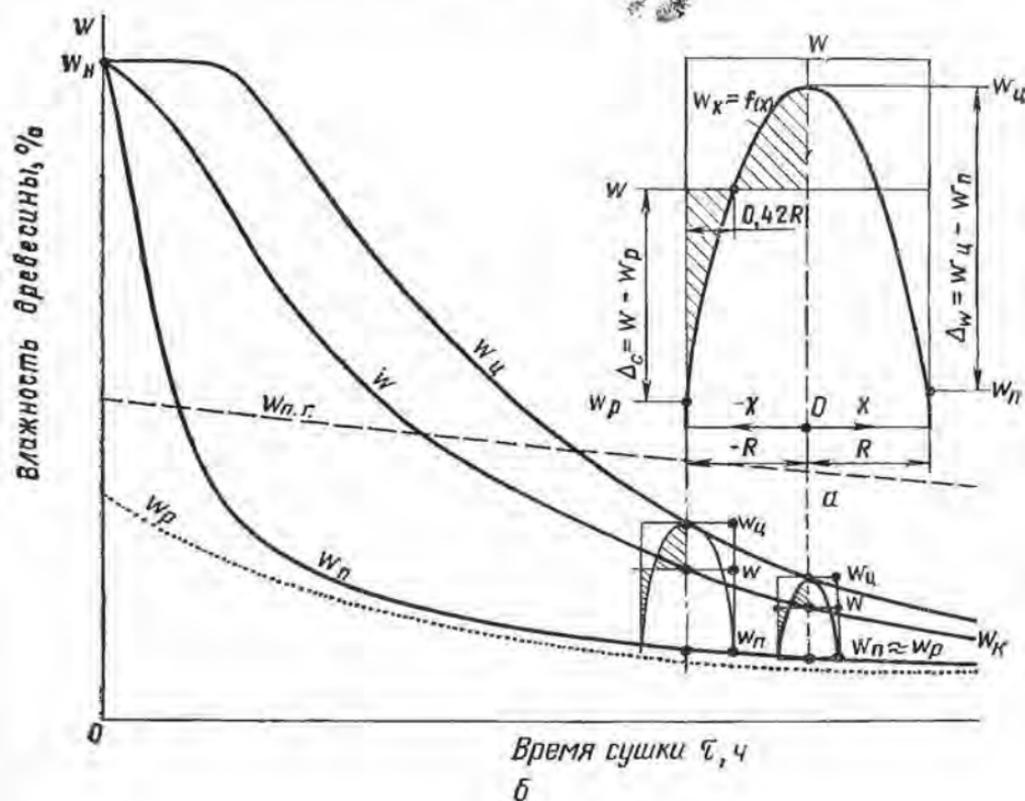


Рис. 64. Совмещенное графическое изображение параметров динамики и кинетики сушки пиломатериалов:

a — кривая влажности со значениями параметров динамики сушки; b — кривые сушки, нанесенные совмещенно 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, a (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_k ; точками показана равновесная w_p влажность воздуха, а пунктиром — влажность предела гигроскопичности $w_{п.г}$ 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 начинался, 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 $w_n=73\%$, $w_p \approx w_r=3\%$ 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 $w_n=3+10,5=13,5\%$. 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 связанной 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 соответственно сжата. 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 связанной 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 Δw на $1/2$ толщины материала, умноженному на средний в данном направлении коэффициент усушки K ,

$$B = K(w_{\text{ц}} - w_{\text{н}}) / 100. \quad (184)$$

Упругие деформации U пропорциональны напряжениям σ и обратно пропорциональны модулю упругости E в поперечном направлении. Координация режимов сушки по упругим деформациям U , 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 $U = \sigma/E$), охвата параметром U влияния переменных при сушке ρ , t , w древесины, а также выявления скорости нарастания остаточных деформаций, являющихся функцией упругих. Измеряют U 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 U . 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 U и остаточных O внутренних деформаций на протяжении сушки пиломатериалов показано графически на рис. 65. На рис. 65, *а* изображены температурные кривые воздуха. Сплошными линиями на рис. 65, *б* нанесены кривые влажности древесины поверхностной ω_n и центральной $\omega_{ц}$ зоны по толщине материала. Кривая средней его влажности ω показана пунктиром. Разность ординат $\omega_{ц} - \omega_n$ обозначает перепад гигроскопической влажности в центральной и поверхностной зонах материала. С учетом (184) получим влажностную деформацию B , непрерывно изменяющуюся во время τ сушки.

Усушка древесины, следовательно, отсчет B начинается от горизонтали $1-3$, т. е. ниже предела гигроскопичности $\omega_{п.г.}$ Вправо от точки 1 на кривой ω_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 U и, следовательно, в первой стадии сушки развиваются напряжения растяжения, способствующие появлению (точка $\tau=2$) и затем накоплению (разность ординат O от нижней кривой ω_n до пунктирной линии) остаточных деформаций (особенно в более напряженной поверхностной зоне). Из-за их развития снижается скорость нарастания упругих деформаций U , достигающих максимального значения в точке 3 , что создает наибольшую опасность наружного растрескивания материала. Затем U 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) непрерывным нарастанием остаточных деформаций O ;
в) равенством $B=U+O$ или $O=B-U$.

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

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 $O = B + U$ или $U = O - B$.

Для получения сухого материала с минимальными B и U 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 U растяжения во внутренней зоне [13, 14]. При последующем охлаждении материала поверхностная влага быстро теряется, поэтому приближается к нулю и величина U ; 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 U и O . Если B приближается к нулю (например, сушка при диатермическом нагреве), к той же величине будут стремиться U и O . Наоборот, U 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 $\omega_{\tau} - \omega_{\tau}$ показана влажностная деформация B , которая до момента времени τ_4 (в точке 4) равна упругой U вместе с остаточной O . В точке 4 упругие деформации U равны нулю и далее меняют знак (см. рис. 65, г, аналогичный рис. 67, а, U), а остаточные se и ab спрямленных участков кривых (пунктирной и ω_{τ}) параллельны между собой.

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

На рис. 65, в изображены значения B и U в виде ординат от горизонтальной оси $0 - \tau$. В регулярном процессе сушки нарастание ординат B и U до точки 3 (максимума B и U) 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 se кривых B и U 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 U -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 \mathcal{U} , которой соответствуют параболические эпюры напряжений $\sigma = \mathcal{U}E$ по толщине материала в I и II стадиях сушки.

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

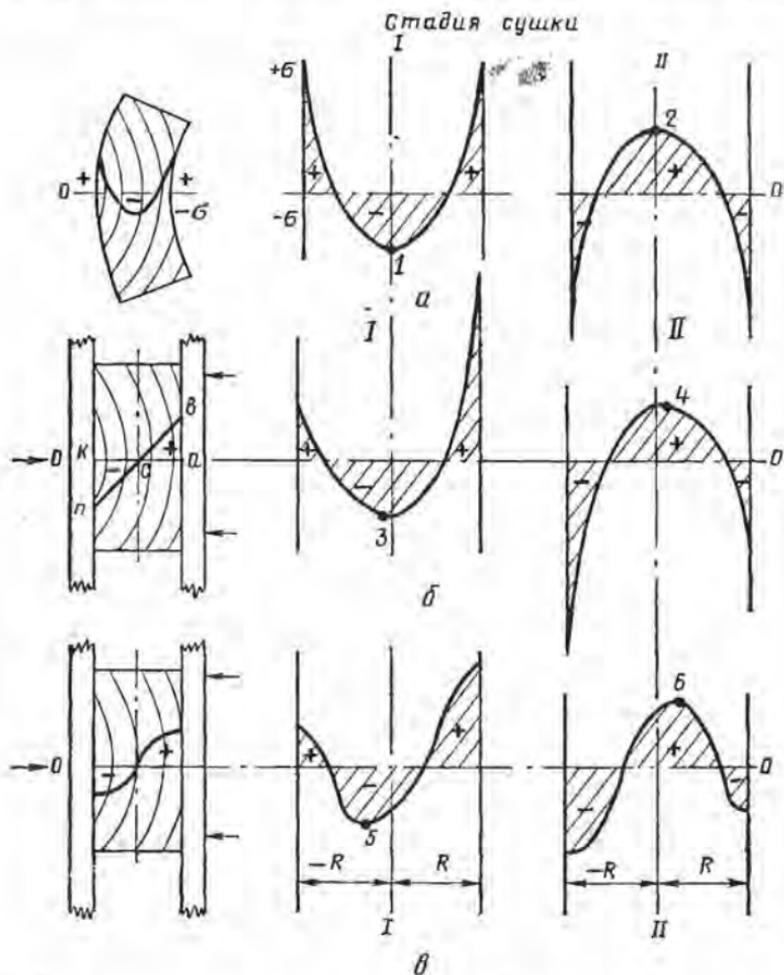


Рис. 66. Возникновение асимметрии напряжений в сохнущем материале из-за противодействия прокладками его короблению

коробления, «изгибая» 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-

ствии 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, *a*) смещаются в положение *3* и *4* (см. рис. 66, *b*), 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 наглядного представления внутренних деформаций в процессе сушки пиломатериалов.

На рис. 67, *a* 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) — *П* — переходное состояние от первой ко второй стадии и *К* — 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 *У*). 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 *У*) проявляются в форме изгиба отделенных слоев со стрелой *f*, показывающего растяжение поверхностной 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 *П* 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 $У$, так и разности остаточных O деформаций по толщине материала, т. е. слои K не показывают изги-

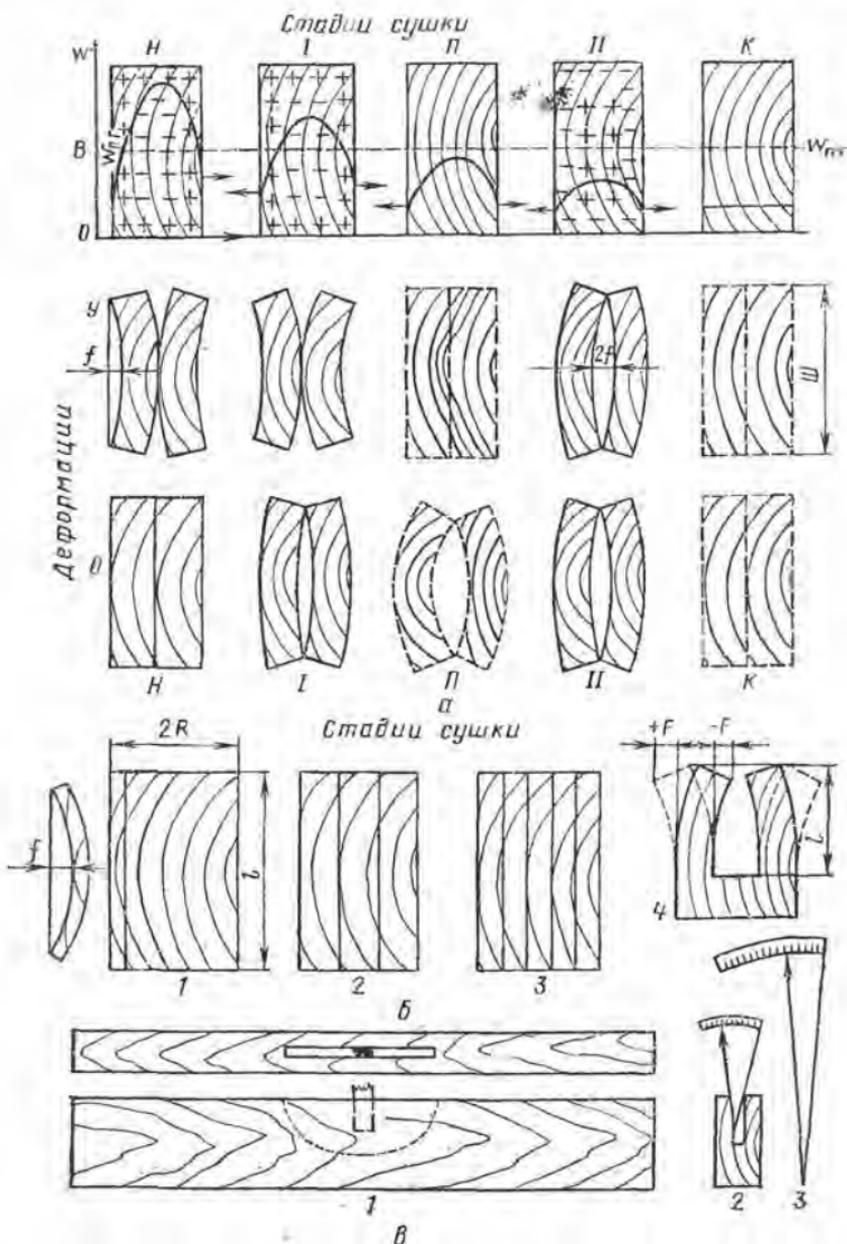


Рис. 67. Методы выявления внутренних деформаций в высушиваемых пиломатериалах

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) откалывают тонкий слой (рис. 67, б, 1); по величине стрелы прогиба f , с учетом длины слоя l , определяется упругая деформация $У$. Принципиально существенно при этом установить время возникновения $У_{\max}$, после чего изгиб слоя начнет уменьшаться, достигая нулевого значения и затем изгибается 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 откалывают 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 тангентальном направлении.

Например, если $f=0,5$ см, $R=2$ см, $l=15$ см и $E=50\,000$ Па (5000 кгс/см²), получим $\sigma_p=2,7 \cdot 50\,000 \cdot 2(0,5/15^2) = 600$ Па (60 кгс/см²).

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 середине 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 середины ширины доски. Для возмещения удаленной с опилками влаги пропил заполняют соответственно увлажненными опилками, а сверху по кромке образца закрывают упругой влагоизоляцией (ее 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 сортиментов 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 сушильным 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 охлажденной газобразной среде.

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

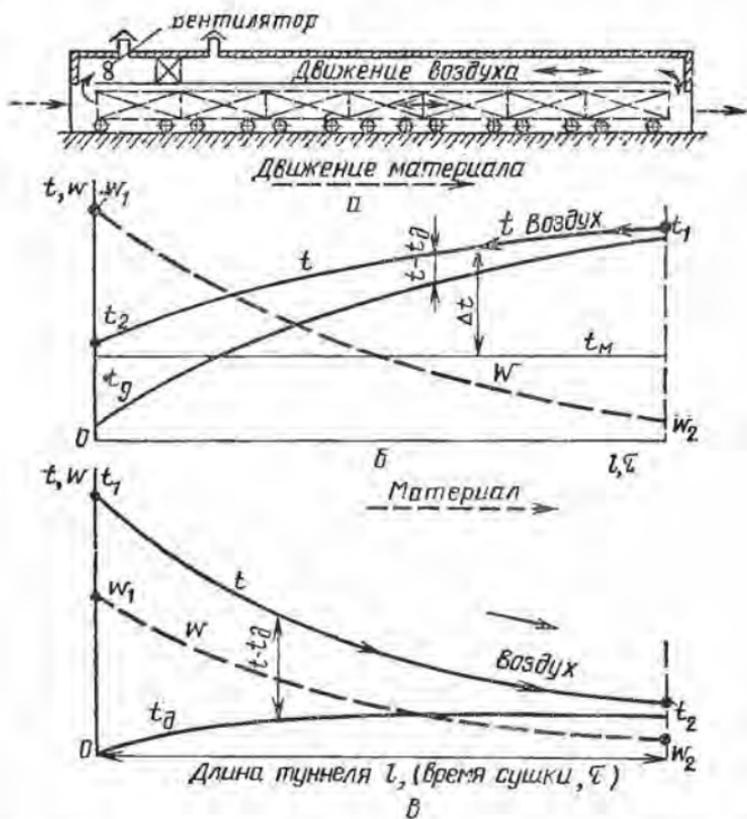


Рис. 68. Противоточный и прямоточный процессы сушки:

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 высушиваемого материала, влияя на его механические свойства и на теплопроводность, 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 H испарения из него влаги [аналогично (33) и (143)]:

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

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:

$$t - t_d = \Delta_t (\varpi_n - \varpi_p) / (\varpi_{n,r} - \varpi_p), \quad (187)$$

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 воздействует на интенсивность сушки поверхности влажного материала [коэффициент s 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, предопределяя 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 стремятся 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 $ж$ может быть приближенно оценена для первой стадии процесса в виде зависимости:

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

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 $ж=1$ и $\tau=5$ сут $\Delta_t=5^\circ\text{C}$. Например, если расчетная продолжительность сушки другого материала 9 сут, а $\Delta_t=8^\circ\text{C}$, $ж = 0,12 \cdot 8 \sqrt[3]{9} = 2$, 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_p . По ориентировочному значению t_m , Δ_t , d , p_p , а также парциальному содержанию массы пара g_p 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	$d, \text{г/кг}$	$\rho_{\text{п}} \frac{\text{кПа}}{\text{кгс/см}^2}$	$g_{\text{п}}$ пара, %
Атмосферная сушка (без подогрева воздуха)	<25	<10	<20	$\frac{<3}{<0,03}$	<2
Низкотемпературная туннельная (подогретым воздухом)	25—45	2—15	20—70	$\frac{3—10}{0,03—0,1}$	5
Нормативная — нормальная (нагретым воздухом)	45—70	3—30	70—300	$\frac{10—30}{0,1—0,3}$	20
Форсированная (значительно нагретым воздухом)	70—85	4—35	300—800	$\frac{30—60}{0,3—0,6}$	40
Паровоздушной смесью	85—96	5—35	800—6000	$\frac{60—90}{0,6—0,9}$	70
Перегретым паром	96—100	6—35	6000—∞	$\frac{90—100}{0,9—1,0}$	>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 торцового растрескивания крупных свежеторцованных сортиментов), ко-

торая продолжается до 0,1τ с психрометрической разностью около 0,6 от принятой для первой ступени сушки [35]. Этим же приемом, но в течение (0,2—0,3)τ, 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. Влагу 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 ($t_m = 70 \dots 85^\circ \text{С}$).

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 растрескивания 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	
		t	Δ_f	t	Δ_f	t	Δ_f	t	Δ_f	t	Δ_f
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 скалывание 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	
		t	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				Психрометри- ческая раз- ность выходя- щего 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 непрерывно 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 высушиваемый материал должен подвергаться по возможности одинаковому, 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 Δt , а не t и Δt . 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 энтальпию 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 теплопроводности 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 U), возникающие в материале, поскольку $U = B - O$. 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 режимными 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) высушенной 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 $\tau_{ц}$ (например, 1 ч) и паузы $\tau_{п}$ 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 цикла короче, чем для мягких и во второй стадии. Для упрощения регулирования длительность цикла можно принять в отдельном процессе постоянной.

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

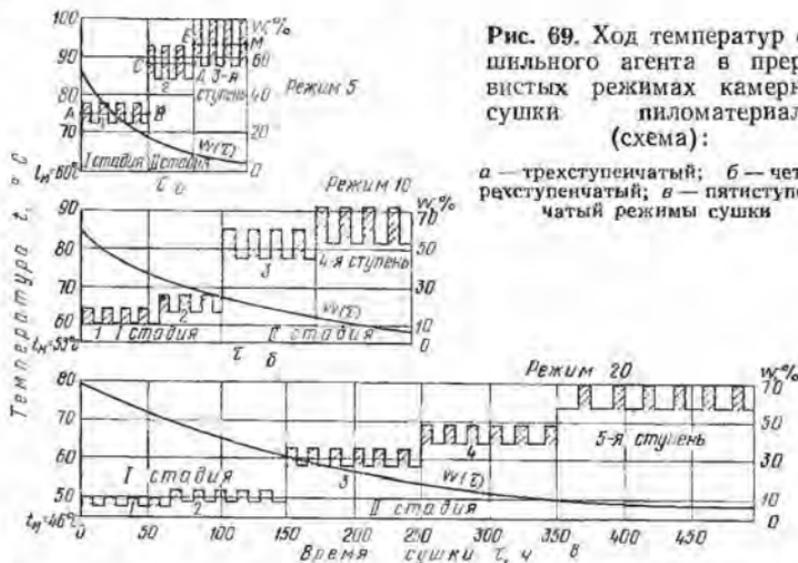


Рис. 69. Ход температур сушильного агента в прерывистых режимах камерной сушки пиломатериалов (схема):

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

Относительное время паузы $\Theta = \tau_{п} / \tau_{ц}$ 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 $t_{м}$ 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 просушки материала.

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

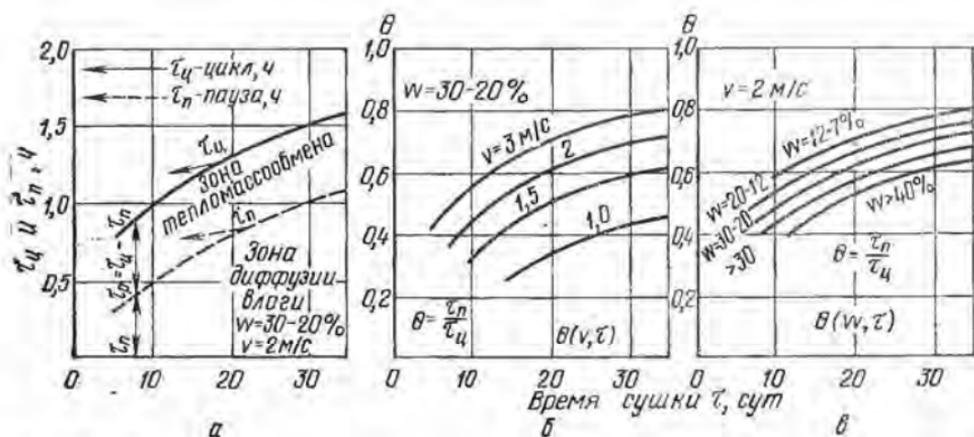


Рис. 70. Закономерности параметров процесса сушки во времени в режимах с прерывистой циркуляцией воздуха:

а — длительность паузы $\tau_{п}$ и цикла $\tau_{ц}$; б — относительное время пауз θ в зависимости от скорости воздуха v по материалу; в — то же от текущей влажности материала

Время паузы $\tau_{п}$ тем больше, чем медленнее просыхает древесина, т. е. чем длительнее расчетный процесс сушки, что изображено графически на рис. 70, а ординатами до пунктирной кривой. Между двумя кривыми отложено время работы вентилятора $\tau_{р}$, равное разности времени цикла и паузы, т. е. $\tau_{р} = \tau_{ц} - \tau_{п}$.

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 теплообменные процессы, близкие к регулярным.

Относительное время пауз $\theta = \tau_{п}/\tau_{ц}$ в камерах с различными скоростями циркуляции воздуха показано на рис. 70, б. Кривые нанесены для материала с продолжительностью сушки до 30 сут.

На рис. 70, в представлена зависимость относительного времени паузы $\theta = \tau_{п}/\tau_{ц}$ 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 $v=2$ м/с, для большей скорости кривые расположатся выше, т. е. возрастет Θ .

После отключения вентилятора влажность поверхности сортифта 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 $\tau_n \rightarrow 0$, то $\Delta'_t \rightarrow \Delta_t$.

С повышением Θ , т. е. относительного удлинения паузы (τ_n/τ_c), 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.

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

По мере повышения гигроскопичности древесины в поверхностной зоне высушиваемого сортифта 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^H)
и с прерывистой циркуляцией воздуха (Δ_t); $V=1,5-2$ м/с

Номера режимов	3	4	5	6	8	10
Температура по мокрому термометру t_m , °С	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, °С	Δ_t^H	Δ_t Δ_t^H				
Влажность древесины, %:						
>50	—	—	—	—	—	—
>40	—	13	7	6	11	6
40—30	9	16	8	15	8	14
30—20	35	42	33	40	31	39
20—12	—	—	—	—	—	—
<12	—	—	—	—	—	—

Номера режимов	12	15	20	25	30	
Температура по мокрому термометру t_m , °С	50	48	46	44	42	
Длительность циклов и пауз $\tau_{\text{ц}}-\tau_{\text{п}}$, мин	65 —35	—	70 —40	—	80 —50	—
Психрометрическая разность, °С	Δ_t	Δ_t^H	Δ_t Δ_t^H	Δ_t Δ_t^H	Δ_t Δ_t^H	Δ_t Δ_t^H
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	—	—	—	—	—	

Примечание. Δ_t — психрометрическая разность при прерывистой работе вентиляторов (в периоды циркуляции воздуха); Δ_t^H — 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

Толщина, мм	Номера режимов сушки					Толщина, мм	Номера режимов сушки				
	ели, пихты	сосны, кедра	березы, ольхи	бука, ясеня, клена, липы, лещины	дуба		ели, пихты	сосны, кедра	березы, ольхи	бука, ясеня, клена, липы, лещины	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 производительности 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 цикличные перемены 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 $\tau_{ц}$. 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 паузы $\Theta = \tau_{п} / \tau_{ц}$ равнозначно удлинению 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 теплотерь) 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	Δ'_t	$v=1,5$		$v=2$		$v=3$		$v=4$		$\tau_{\text{ц}}$
			Δ''_t	Θ	Δ''_t	Θ	Δ''_t	Θ	Δ''_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. Δ'_t — психрометрическая разность на разгрузочном конце; Δ''_t — психрометрическая разность на загрузочном конце туннеля; v — усредненная скорость воздуха по материалу, м/с; $\Theta = \tau_{\text{п}}/\tau_{\text{ц}}$ — относительное время паузы ($\tau_{\text{п}}$ — длительность паузы, ч; $\tau_{\text{ц}}$ — длительность цикла, ч).

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

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 pn можно выявлять по легко замеряемой температурной кривой ke .

Применение температур выше 100° С

Процессы высушивания тонких пиломатериалов (толщиной 13; 16; 19 мм) малозучены. 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 досок толщиной 20 мм при температуре по мокрому термометру 90° С и по сухому 130; 150 и 180° С составляет соответствен-

но 6,8; 5,3 и 3,4 ч [36]. Интенсивнее 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

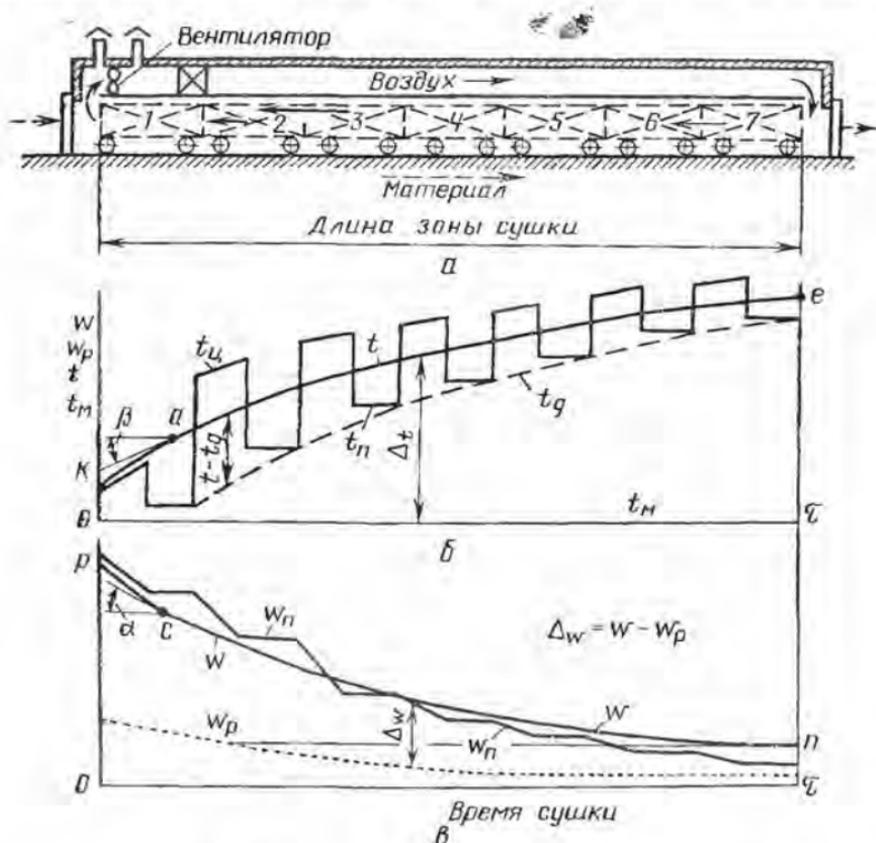


Рис. 71. Прерывистый противоточный процесс сушки:

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 не растрескивающихся 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 ϕ . 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 камеру 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. Пластовые трещины появляются на наружной пласте досок; на внутренней пласте (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 сортах, часто являются продолжением наружных трещин (рис. 72, а), образующихся в первой стадии сушки, затем смыкающихся (рис. 72, б). Однако размеры раковин увеличатся, если в материале не возникало

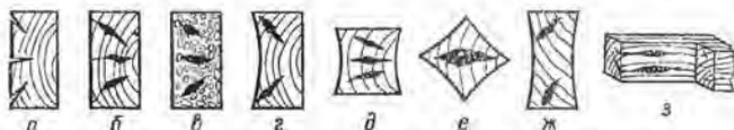


Рис. 72. Растрескивание древесины при сушке:

а — наружные трещины; б — заглубление наружных трещин и переход их в раковины; в — различные деформации круглых сосудов древесины в сечении доски; г — утончение 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 сортамента они будут остаточного 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 сортамента 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 сортаменты 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 сортаменты (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, ^иизгибается) 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) — придание 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 выравнивать 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 ω_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 остаточно (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

$$Y = O - B, \quad (192)$$

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 влагонезащищенными 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]:

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

где	a	b	c	k
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 выразятся 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 $\lg \omega$. 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 камеру к воздуху и создающий среду с насыщенностью пара, близкой к единице. Психрометрическая разность в кирпичных камерах поддерживается 2—3° С, а температура на 8° С выше, чем в последней ступени режима, но не более 100° С.

Продолжительность конечной влаготеплообработки определяется скоростью развития остаточных деформаций и выравни-

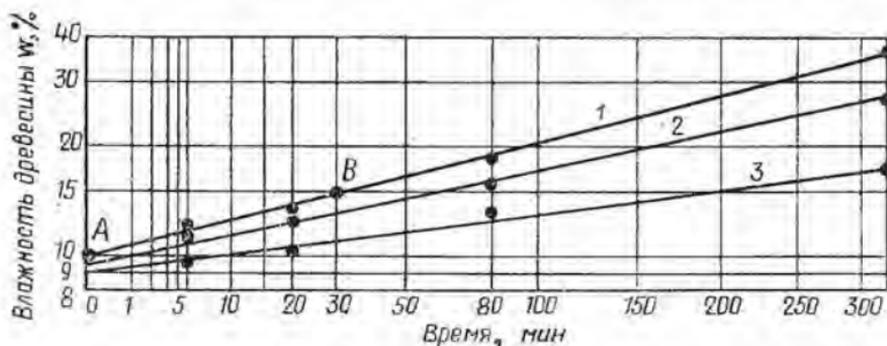


Рис. 73. Диаграмма увлажнения пиломатериалов:

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).

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 получают 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 м³/с или около 100 000 м³/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 одни 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 ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ

Основные закономерности воздушного потока

При конвективной сушке воздух должен беспрерывно подводится 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:

$$V = Fv = F_1v_1, \quad (198)$$

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

$$F = V/v = F_1v_1/v \text{ или } v = V/F = F_1v_1/F. \quad (199)$$

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

$$H = H_{ст_1} + \frac{\rho v_1^2}{2} = H_{ст_2} + \frac{\rho v_2^2}{2} = \text{const} \quad (200)$$

$$\left[H = H_{ст_1} + \frac{\rho v_1^2}{2g} = H_{ст_2} + \frac{\rho v_2^2}{2g} = \text{const} \right],$$

где $H_{ст_1}$ и $H_{ст_2}$ — статическое давление в первом и втором сечениях 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:

$$H = H_{ст} + H_d. \quad (201)$$

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

$$-H = H_d + (-H_{ст}). \quad (202)$$

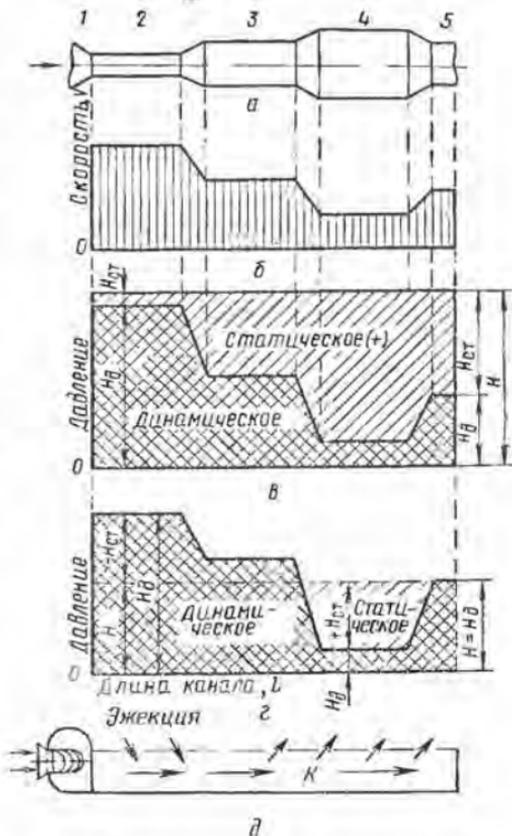
Указанные зависимости представлены графически на рис. 74. В канале переменного сечения без учета сопротивлений (рис. 74, а) перемещается воздух постоянной плотности. Ско-

рости 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 $H = H_{ст}' + H_{д}$ с различными положительными значениями $H_{ст}$ и $H_{д}$ (рис. 74, в). Если из участка 5 воздух вытекает в атмосферу, статического давления в нем нет ($H_{ст} = 0$) и $H = -H_{д}$, как это показано справа на рис. 74, з. При этом в участке 4 (с малым динамическим давлением) возникает положительное статическое давление ($+H_{ст}$), а на участке 2 (с большим динамическим давлением) создается отрицательное статическое давление ($-H_{ст}$). Поэтому для участка 4 будет $H = H_{д} + H_{ст}$, а для участка 2 $H = H_{д} - H_{ст}$.

Отсюда согласно схеме рис. 74, з 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 Бернулли:

а — канал переменного сечения; б — эпюра скоростей воздуха по длине канала; в — эпюра давлений по длине канала при подпоре $H_{ст}$ 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 $H_{д}$, 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: $Re = vd/\nu$ (см. табл. 7). Здесь ν — кинематическая вязкость воздуха, зависящая от температуры, имеет следующие значения:

$t, ^\circ\text{C}$	0	20	50	100	150	200	300	500	800
$\nu 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	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 $\nu \approx 2,0 \cdot 10^{-5}$. Турбулентное движение воздуха предпочтительнее — возрастает теплоотдача.

Для каналов прямоугольного поперечного сечения со сторонами a и b величина эквивалентного диаметра $d_{\text{эк}}$ будет:

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

Пример. Выявить минимально допустимую скорость воздуха ($Re > 2300$) с температурой 70°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: $d_{\text{эк}} = 2 \cdot 1 \cdot 0,02 / (1 + 0,02) = 0,04$ м. Приняв это значение $d_{\text{эк}}$ и используя соотношение для Re , определим минимальную скорость воздуха в штабеле пиломатериалов:

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

Учитывая, что вблизи прокладок возможно ламинарное движение воздуха, установим минимально допустимую его скорость внутри штабеля 2 м/с. В этом случае $\text{Re} \approx 3000$, 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 $\text{Re} > 100\,000$, 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 неоштукатуренных 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 $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$ равны

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

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 $\alpha=90; 120; 150^\circ$, соответственно: $\xi=1,1; 0,55; 0,2$ (рис. 75, *в*).

4. Прямоугольное колено со скошенным 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>)

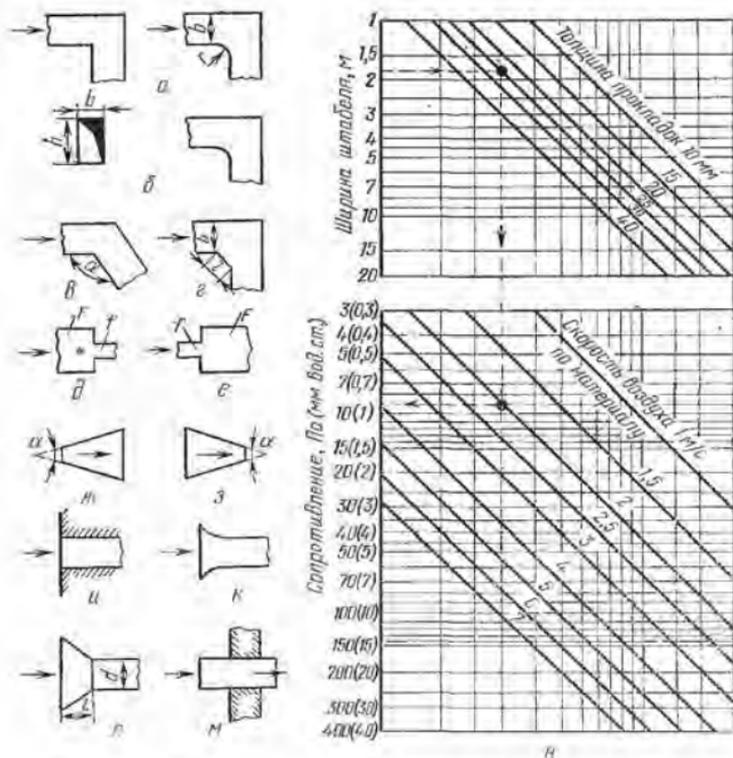


Рис. 75. Аэродинамические местные сопротивления

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 раструбом $\alpha = 45^\circ$, 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 шпаций, 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) [11], 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 отбортовкой трубы наружу или установкой входного раструба 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 (м³/с). Давление H выражает силу на 1 м² сечения потока воздуха, а V , (м³/с) — путь перемещения воздуха в трубе сечением 1 м². 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 желательнее 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

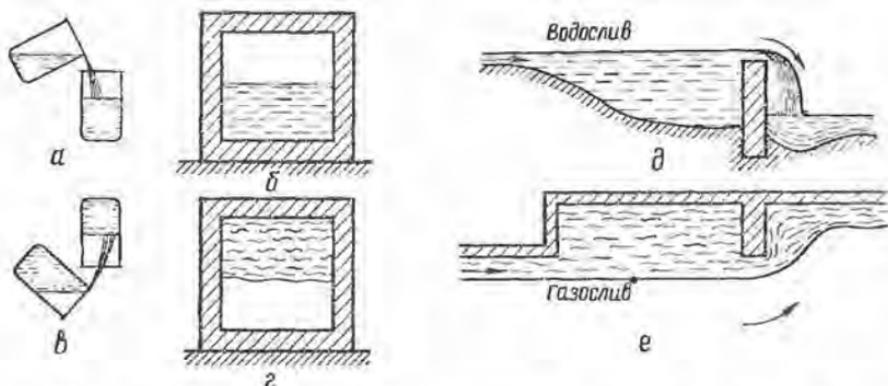


Рис. 76. Движение газов и жидкостей различной плотности:

a и *б* — более тяжелых; *в* и *г* — более легких; *д* — воды через плотину; *е* — нагретого газа через перемычку

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, *a* 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 перемышку аналогичную плотине для задержания воды, но в опрокинутом виде. Избыток горячих газов будет переливаться через перемышку 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) $0-0$ (рис. 77, *а*) на середине высоты камеры дав-

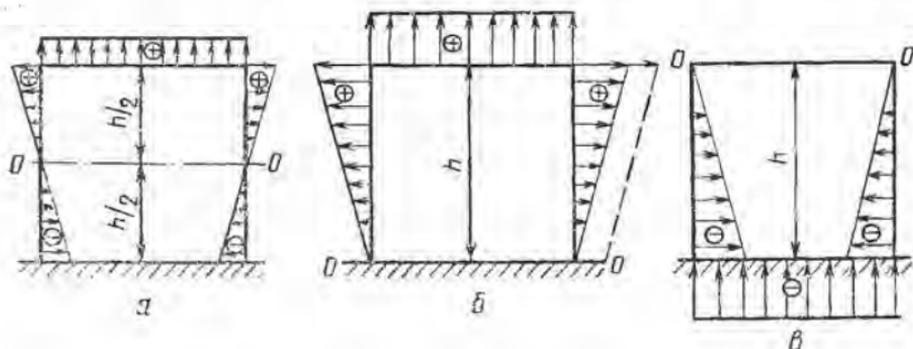


Рис. 77. Распределение давлений на ограждения камеры с нагретым воздухом при уровне нейтральной плоскости $0-0$:

а — на середине высоты камеры; *б* — внизу камеры; *в* —верху камеры

ление в камере по сравнению с наружным равномерно нарастает вверх от нейтральной плоскости, достигая у перекрытия

наибольшего положительного значения $\Delta_n = \frac{h}{2}(\rho_1 - \rho)$,

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 ней 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 определится 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 $0,9 \text{ кг/м}^3$, а снаружи $1,3 \text{ кг/м}^3$. Если нейтральная плоскость находится на высоте 2 м от пола (рис. 77, а), получим давление вверх камеры

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

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

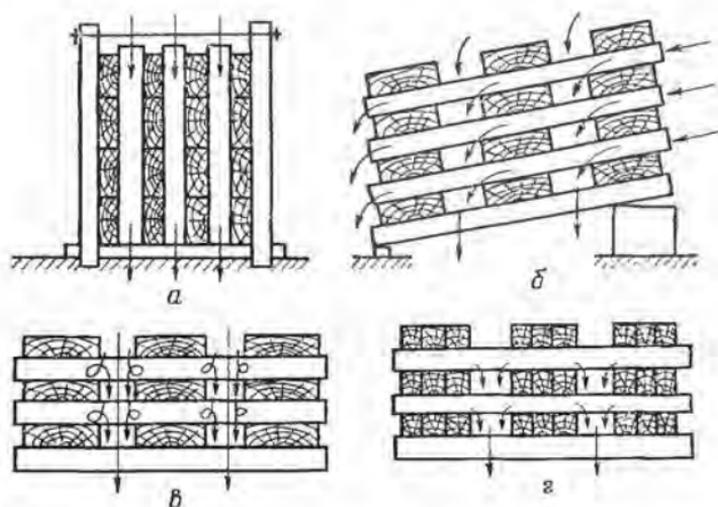


Рис. 78. Свободное движение воздуха по высушиваемому материалу при различной его укладке в штабель:
 а — ребровая (вертикальная); б — наклонная; в — горизонтальная; г — горизонтальная групповая

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 увлажнившегося воздуха необходимо строго соблюдать вертикальное распо-

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 эксплуатировать 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-

рванного (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_n — приращение статического давления на участке $I-II$ длиной x , λ — коэффициент трения [см. (204)], то

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

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

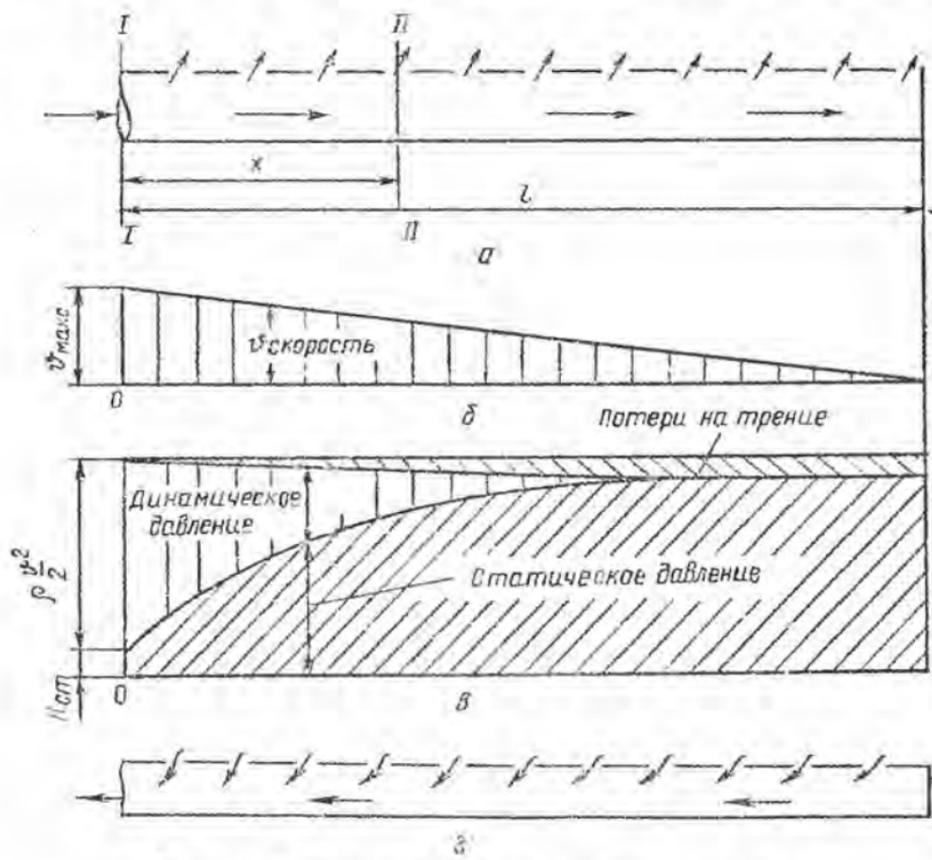


Рис. 79. Распределительный и отборный каналы:

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 повлияет 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 вступаящего 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 середине 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 больше 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. Опытном 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.

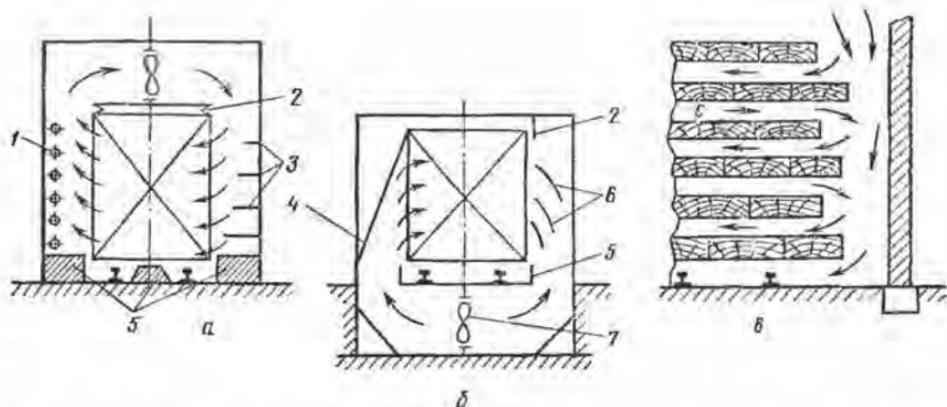


Рис. 80. Методы улучшения распределения воздуха по высоте штабеля: а — тормозящие поток воздуха устройства; б — распределительные устройства; 1 — ребристая труба; 2 — подвесная штора; 3 — настенные полки; 4 — наклонная стенка; 5 — экраны; 6 — направляющие лопатки; 7 — вентилятор; в — влияние выступающих 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 *c*). 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, отсасывается из

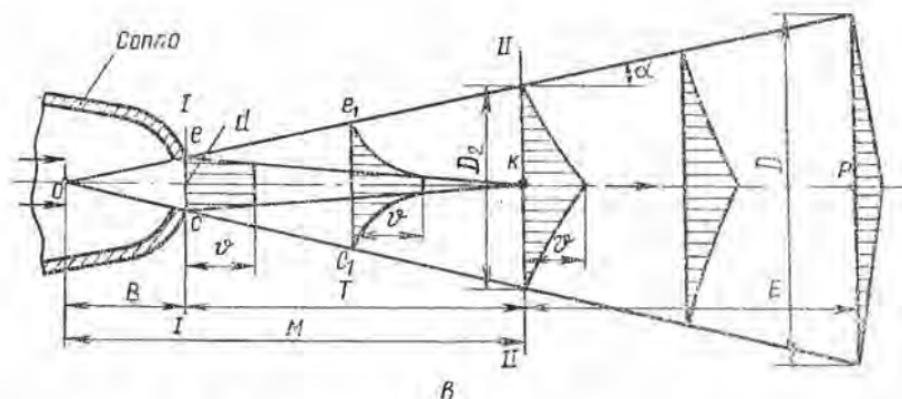
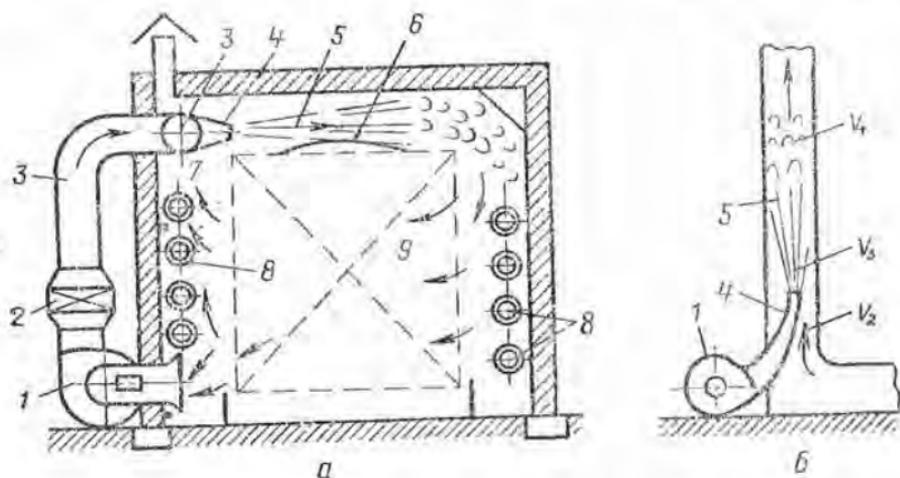


Рис. 81. Схема эжекционной циркуляции воздуха:

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; а — 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 подсосываемого (эжектируемого) и V_1 — суммарный его объем. Кратность эжекции $m = V_1/V_3$.

Остановимся на свойствах и геометрических соотношениях эжектирующей струи. Элюры 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° . 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 сече-

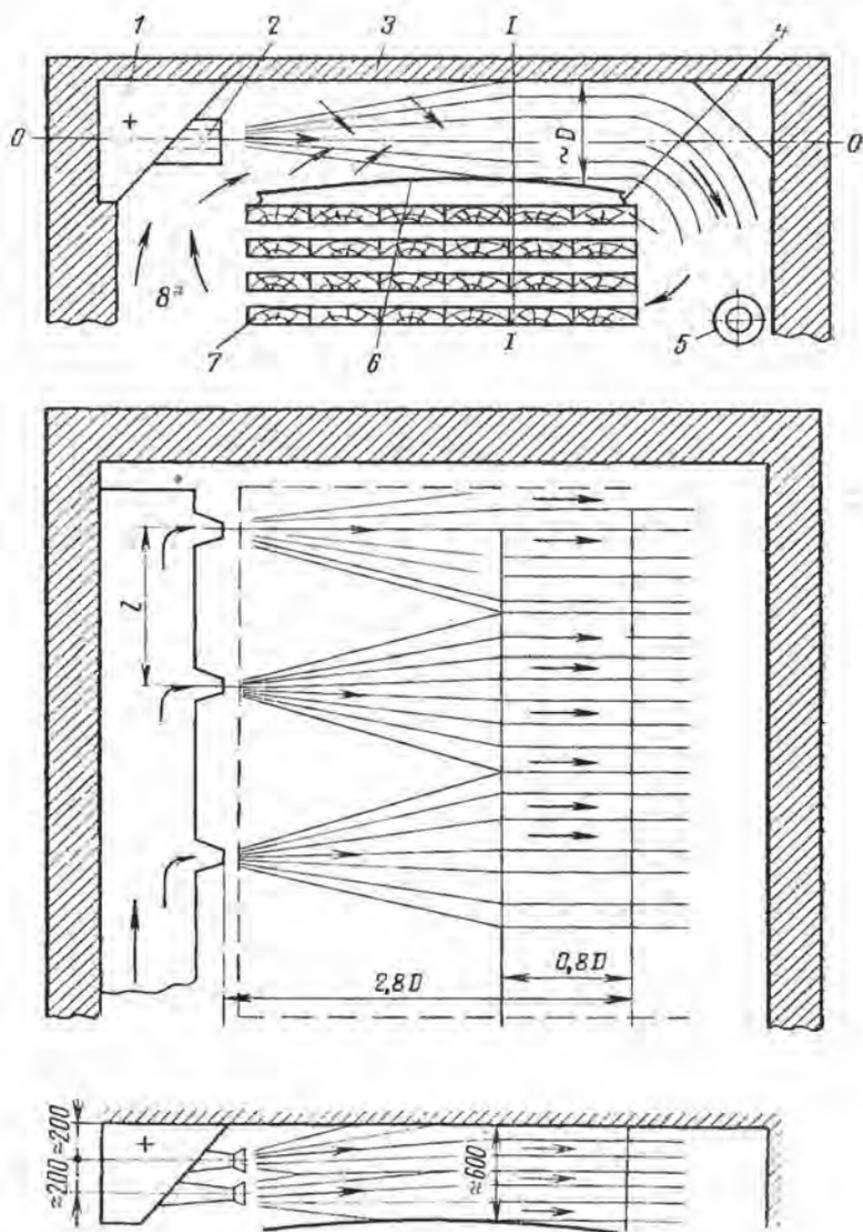


Рис. 82. Сопряжение смежных струй воздуха:

1 — нагнетательный канал; 2 — сопло; 3 — перекрытие сушильной камеры — верхний экран камеры смешения эжектора; 4 — брезентовый экран (надрезанный); 5 — calorifier; 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 смещения ($O-O$).

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 (большой 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 смещения 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 смещения 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 омыванию 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 ν 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

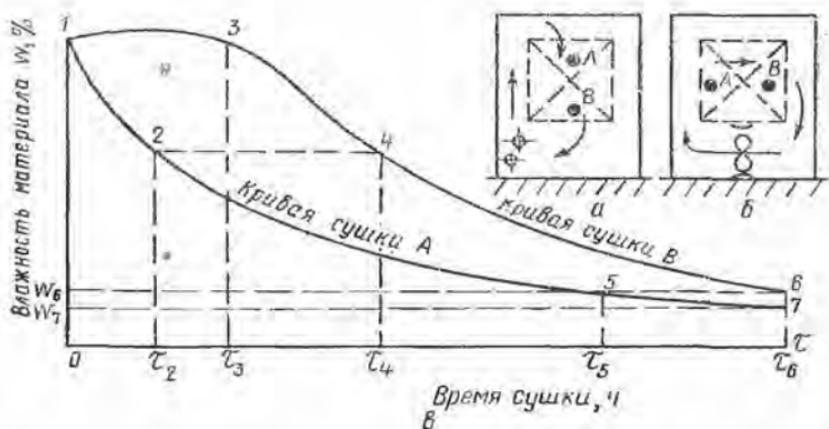


Рис. 83. Неравномерность просыхания материала при односторонней циркуляции воздуха в штабеле:

а — при вертикальном движении воздуха; б — при горизонтальном его движении; в — кривые сушки А и В материала в точках А и В 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

$$x = \frac{a}{v} \ln(\omega_M - \omega + 1) + C, \quad (210)$$

где постоянная интегрирования C определится из условия $x=0$, когда $\omega=\omega_M$, поэтому $C=0$, т. е. в ширине штабеля a .

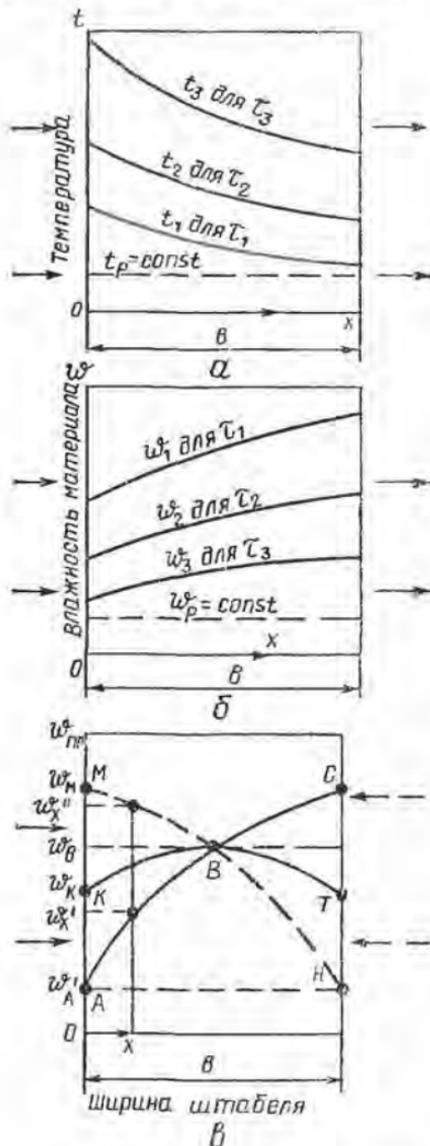
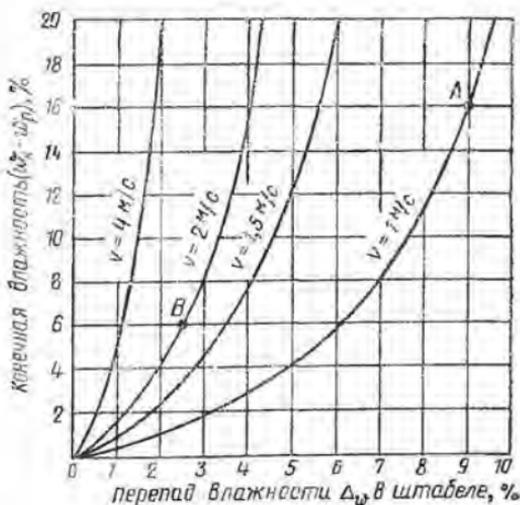


Рис. 84. Изменение по ширине штабеля материала:

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

Рис. 85. Перепады влажности $\Delta\omega$ материала в штабеле при одностороннем движении воздуха с различной скоростью



Таким образом, для закономерной неравномерности влажности древесины получим

$$\omega_M - \omega = \Delta\omega = e^{\frac{a}{v}(b-x)} - 1. \quad (211)$$

На рис. 85 приведена диаграмма, построенная по (211) при расчетном для каждого сортимента количестве воздуха, когда $w_n=60\%$ 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 А), а при $v=2$ м/с и $w_k-w_p=8-2=6\%$ определим $\Delta_w=2,5\%$ (точка В).

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

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

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 середине и у боков штабеля) приблизительно 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 связанной 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 загруженно-

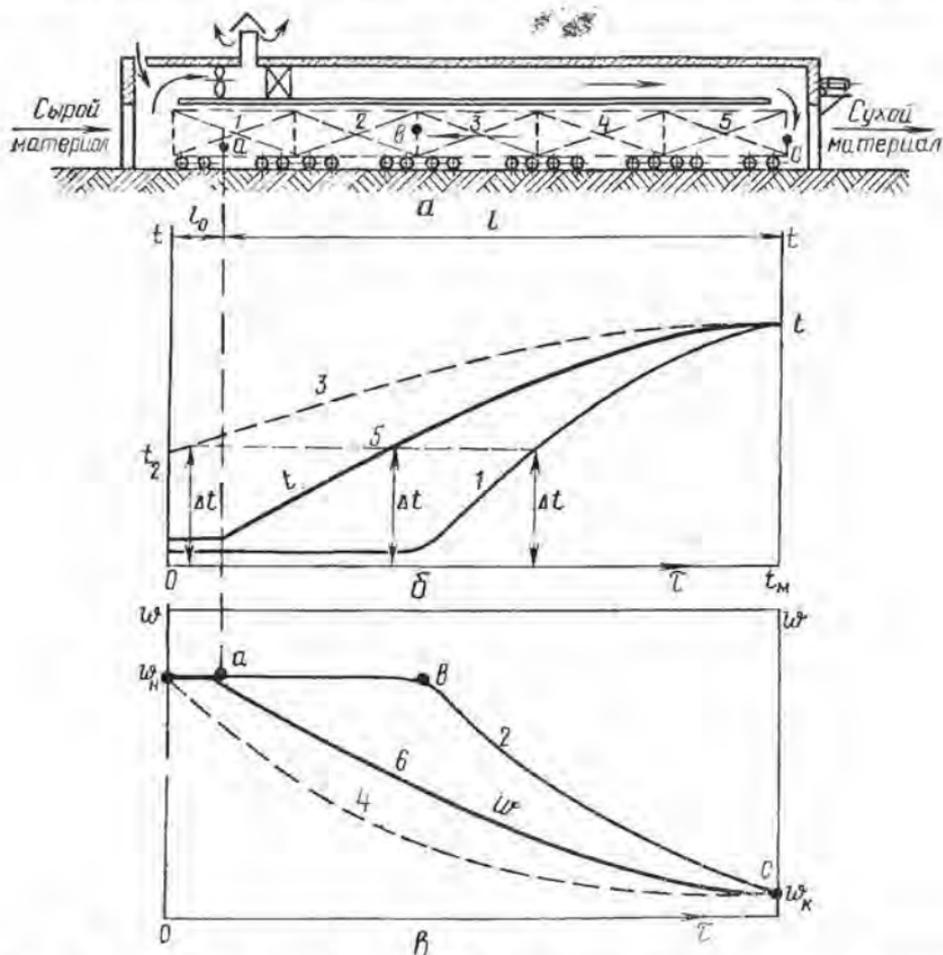


Рис. 86. Зависимость процесса сушки в противоточном туннеле от количества подаваемого воздуха:

а — схема сушильного туннеля; б — кривые температур; в — кривые сушки; 1, 2 — кривые при недостатке; 3, 4 — избытке; 5, 6 — нормальном количестве 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).

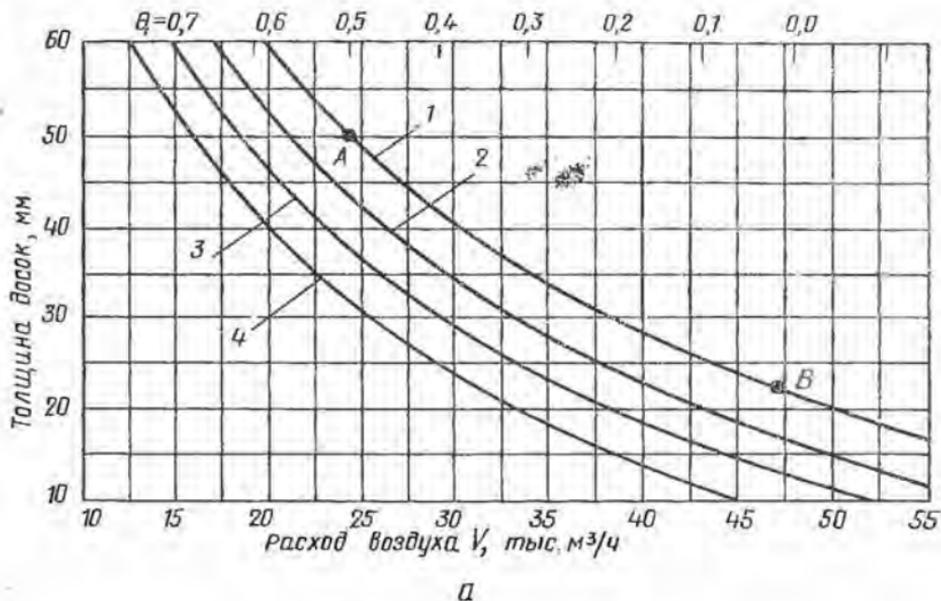
Например, при $T=25$ мм и $v=2$ м/с длина пути воздуха по материалу должна быть $l=2\sqrt{25}=10$ м.

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

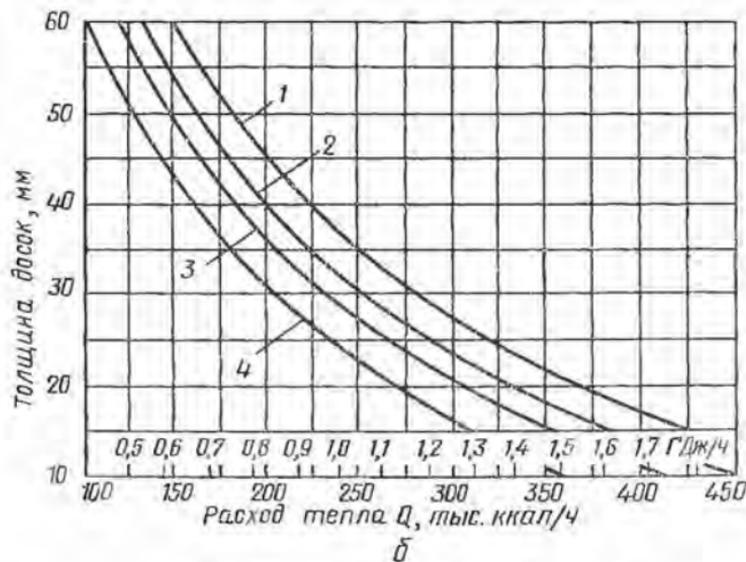
Влияние толщины материала на часовую потребность в воздухе и тепле

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

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, применяя 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 $(0, 0)$ вверх диаграммы. Для половинного расхода воздуха (точка A) отложим значение $\Theta=0,5$; это значит, что вентилятор подаст требуемое количество воздуха для новых условий ($T=50$ мм) за половинное время его работы. Построим шкалу значений Θ вверх 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 ω_k древесины будет ниже, чем ω 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, $\omega - \omega_k$ на рис. 86, в, 2). Рассматриваемая зависимость выражается уравнением [10]:

$$\omega/\omega_k = (\omega_n/\omega_k)^{1/n}, \quad (214)$$

где n — число штабелей.

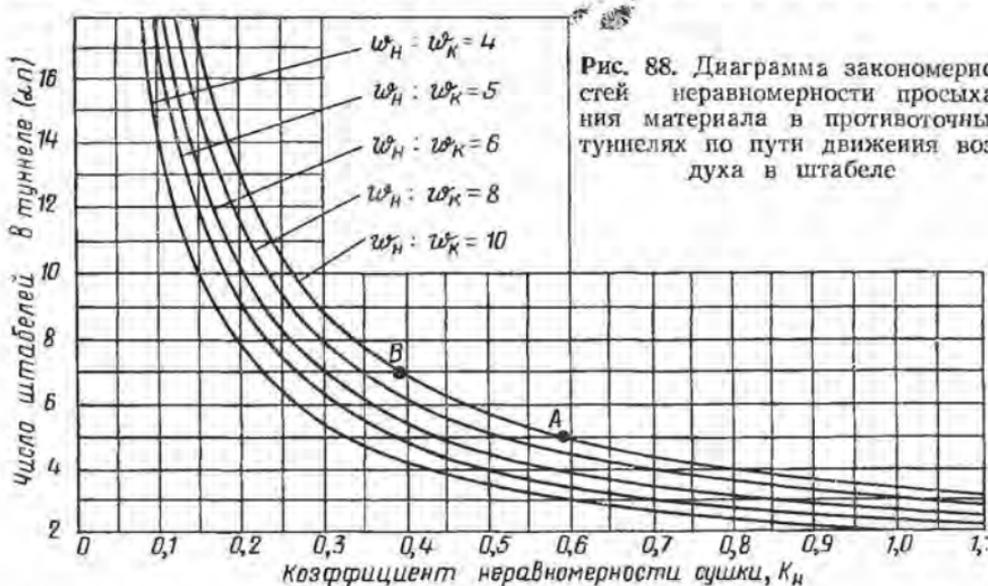
Если отношение $(\omega - \omega_k)/\omega_k = \Delta\omega/\omega_k = K_n$, (215)
назвать коэффициентом закономерной неравномерности сушки,

то

$$K_H = \Delta_w / \omega_K = (\omega_H / \omega_K)^{1/n} - 1. \quad (216)$$

Чем меньше отношение начальной влажности ω_H к конечной ω_K , тем меньше K_H , т. е. равномернее просыхает материал.

Зависимость по (216) представлена графически на рис. 88. При $\omega_H / \omega_K = 10$ и $n = 5$ (точка А) получим $K_H = 0,58$, т. е. в случае конечной влажности древесины в переднем конце штабеля



$\omega_K = 10\%$ 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 $K_H = 0,39$ и соответствующая влажность древесины $\omega = 13,9\%$ (точка В); если из-за недостатка воздуха $n = 3$, то $K_H = 0,85$ и $\omega = 18,5\%$, 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

$$K_H = [(\omega_H / \omega_K)^{1/\alpha n}] - 1 = [(\omega_H / \omega_K)^{V/nV_1}] - 1. \quad (217)$$

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 изготавливаемой 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 металлов 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 $p_{п} > 0,1$ МПа (> 1 кгс/см² 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

частиц 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 осуществ-

Классификация лесосушильных установок

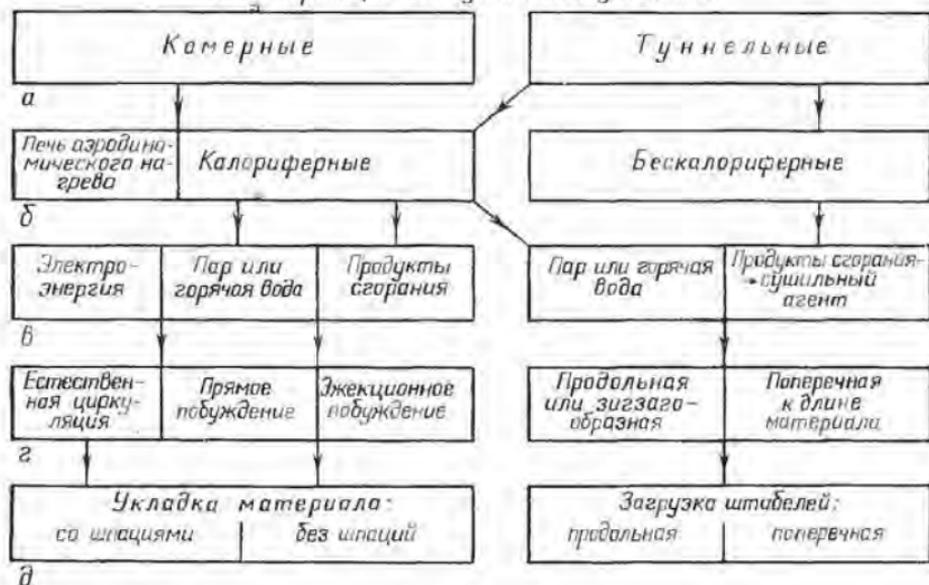


Рис. 89. Классификация лесосушильных установок:

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 туннели *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 (боровные камеры). В *бескалориферных* 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 древесного топлива или природного газа.

По характеру движения сушильного агента в штабеле материала 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, осуществляемой 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 примерным 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 воздуха по материалу и воздухообмен (вентиляцию). Многократная (>50 раз) циркуляция происходит по замкнутому пути: нагрев воздуха — испарение влаги — нагрев воздуха и т. д. Воздухообменом называется добавка в камеру или туннель к циркулирующему воздуху 1—3% наружного воздуха и выброс влажного. Часто в организованном воздухообмене нет надобности из-за обычного излишка неорганизованного воздухообмена.

При рассмотрении сушильных установок основное внимание будет уделено циркуляции воздуха по материалу. В приводимых далее схемах воспроизведены основные типы установок, используемых в промышленности, или перспективных.

50. ТИПОРАЗМЕРЫ ШТАБЕЛЕЙ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Вследствие значительной продолжительности сушки пиломатериалов (1—30 сут.) конвейерный метод их отдельного 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 сушильно-го 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. Этому 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 отпала 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 просыхания 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 брус. 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 (m^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 $1,8 \times 2,6 \times 6,5 = 30,4 m^3$ годовая производительность штабеле-места при высушивании сосновых досок толщиной 50 мм равна $30,4 \times 32 \approx 1000 m^3/год$.

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-

сясь с калорифером, нагревается, поднимается вверх, 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-

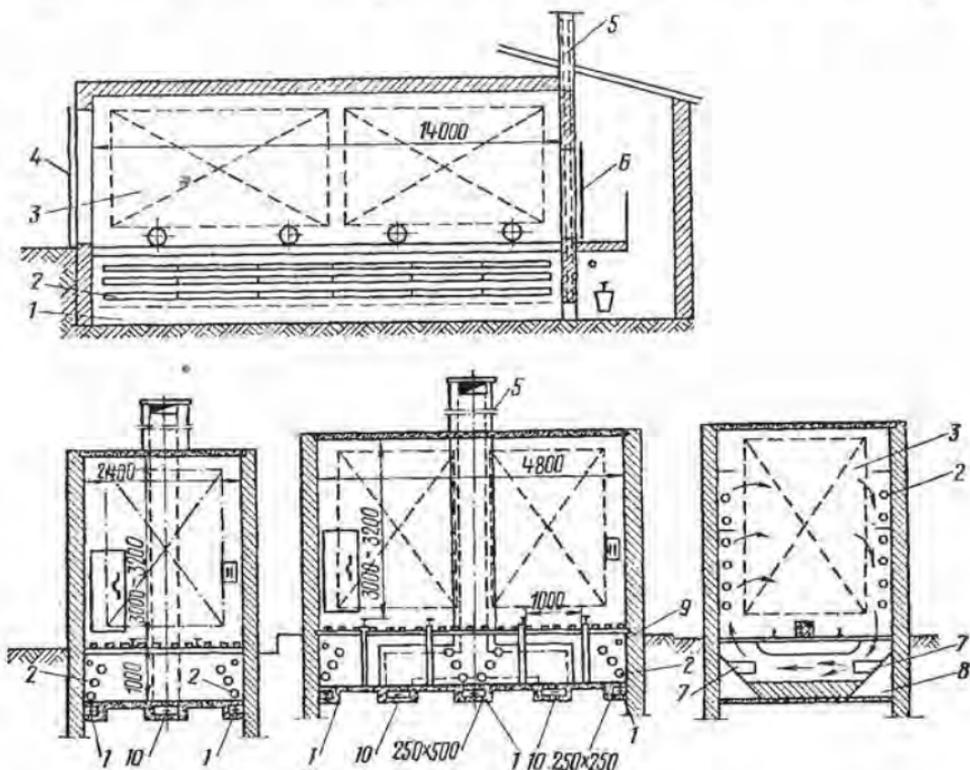


Рис. 90. Лесосушительная камера «Грум»:

1 — приточные каналы; 2 — калориферы; 3 — высушиваемый материал; 4 — дверь; 5 — вытяжная труба; 6 — контрольная дверка; 7 — сопла; 8 — нагнетательный канал; 9 — увлажнительная 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-

статки 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 устранены. При укладке пиломатериалов особенно строгие требования предъявляют к точности вертикальности рядов шпаций. Однако доски желательно укладывать без шпаций, сплавивая 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.

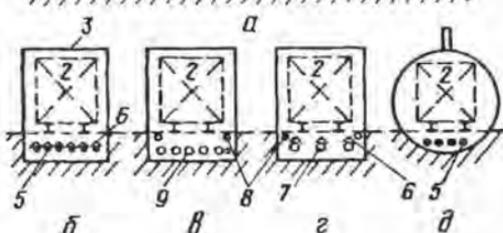
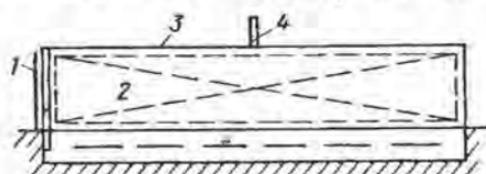
Малые камеры с естественной циркуляцией воздуха

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 м³/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 металлическими, 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:

a — продольный разрез; *б, в, г, д* — поперечные разрез; 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 продуктов сгорания. 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.

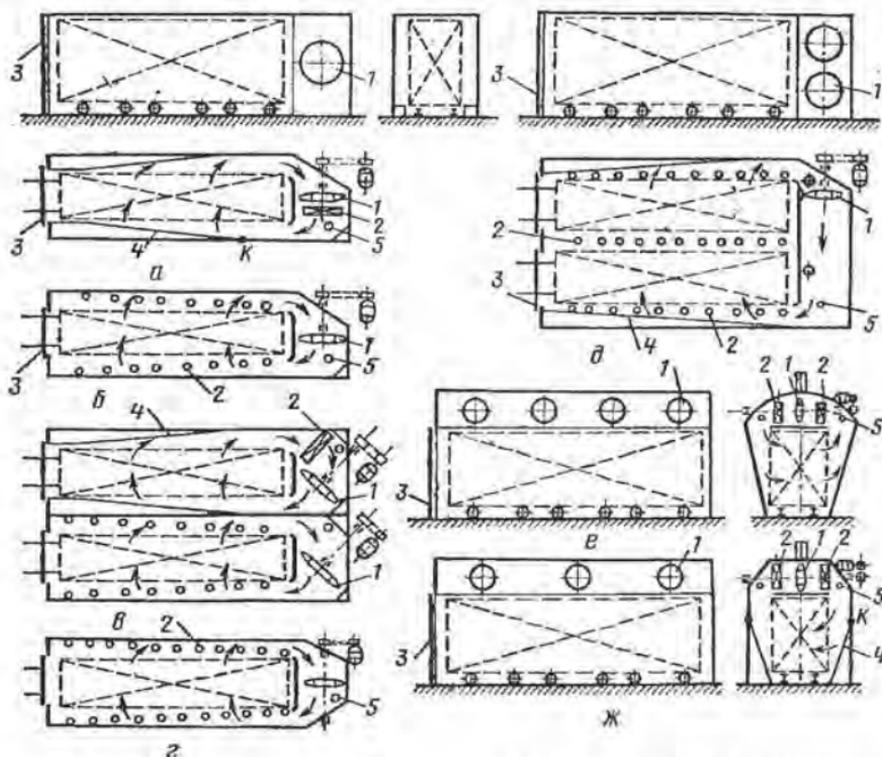


Рис. 92. Схемы коротких (одноштабельных по длине) камер:

а — камера ТВ с пластинчатым калорифером; б — то же с ребристыми трубами; в — то же с повернутой установкой вентилятора; г — камера ТВК с выступающими концами вала; д — камера СПЛК-2; е — камера СПВ-62; ж — камера СПВ-63; 1 — вентилятор; 2 — калорифер; 3 — дверь; 4 — экран; 5 — увлажнительные 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:						
<i>a</i>	1,8-2,6	1,35-2,6	1,35-1,9	0,9-1,9	0,9-1,3	0,65-0,9
<i>b</i>	1,3-4,0	—	0,9-2,6	—	0,65-1,9	
Габаритный объем штабеля V , м ³	30,8	22,3	16,3	11,3	7,7	3,9
Необходимый объем воздуха V_0 , тыс. м ³ /ч	100	65	40	25	15	8
Номер вентилятора У12 D, 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 теплотери.

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, з), а сечение штабеля $1,8 \times 2,6$ м. Пластинчатые калориферы, показанные на рис. 92, а, в, устанавливаются 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 сушимым материалом. В качестве сушильного агента проектируют применение перегретого пара атмосферного давления, выделяющегося из сушимого 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 и 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; удешевление 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 наверху, сбоку вентиляторов, поэтому монтировать и обслуживать калориферы затруднительно. Такие камеры группируют 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 Гипродревпромом.

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

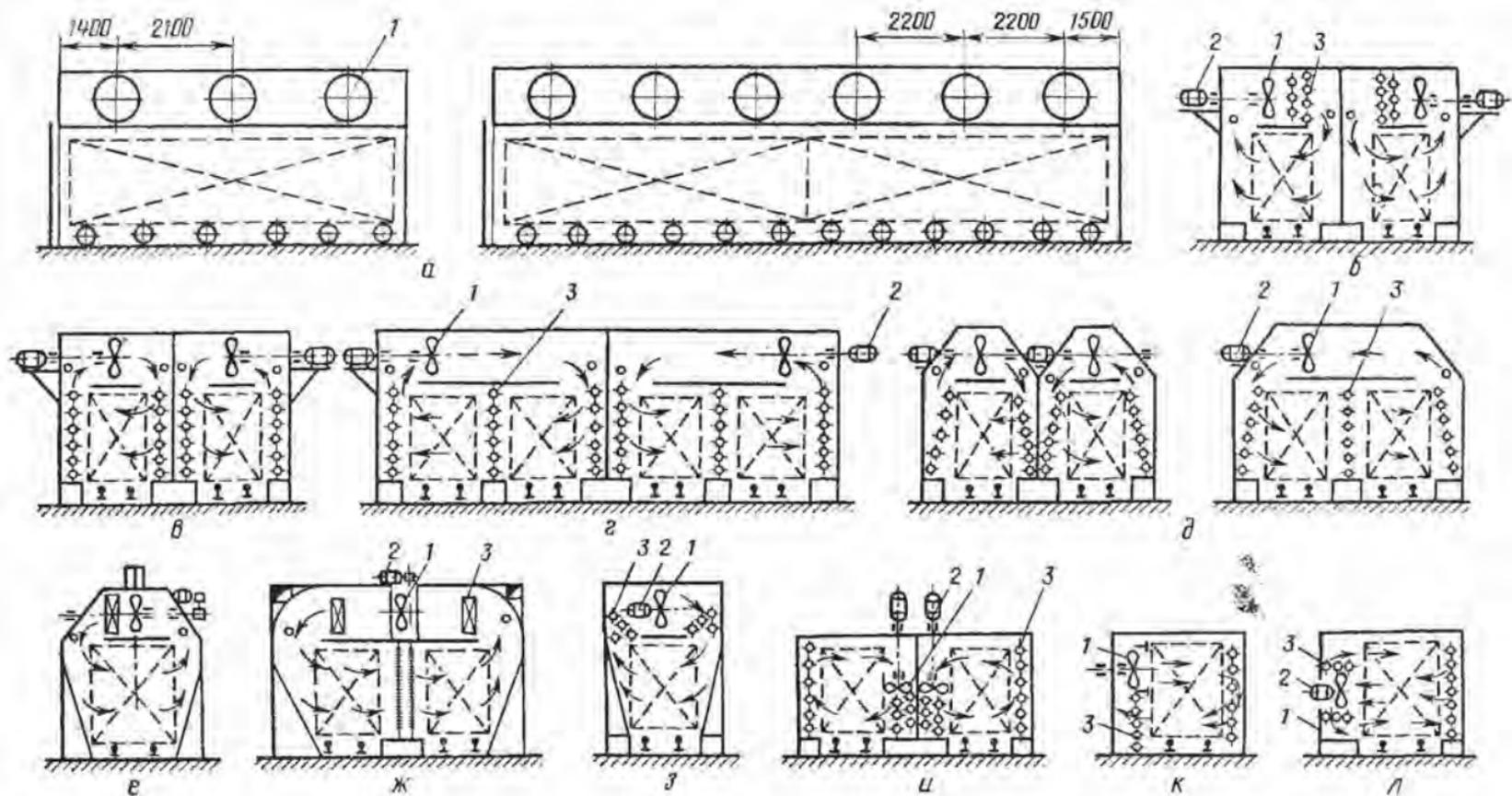


Рис. 93. Схемы паровых сушильных камер с осевыми вентиляторами на коротких валах:

а, б — камера ВИАМ-40; в — камера МТИ-1 (одноэтабальная) и камера МТИ-2 (двухэтабальная); г — камера МТИ-2-2 (двухпутная четырёхэтабальная); д — камера МТИ-3 (одноэтабальная), МТИ-4 (двухэтабальная) и МТИ-4-2 (четырёхэтабальная); е — камера СПВ-64 (двухэтабальная); ж — камера ЛТА — Гипродрев; з — шведская камера; и — камеры МТИ-5 (одноэтабальная) и МТИ-6 (двухэтабальная); к — польская камера; л — камера Шильде; 1 — вентилятор; 2 — электродвигатель; 3 — calorifier

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, совершая замкнутую циркуляцию. Периодически поток воздуха реверсируется. Таким образом, для получения в штабеле нормальной скорости воздуха требуется половинное его количество, 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, е — ВИАМ-1). Между вентиляторами для воздуха устанавливают перегородки (рис. 94, д). При этом поток воздуха перемещается односторонне.

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 подачи воздуха каждой группы из трех вентиляторов на обеих половинах по длине вала, где установлены вентиляторы с противоположным наклоном лопаток (рис. 94, е).

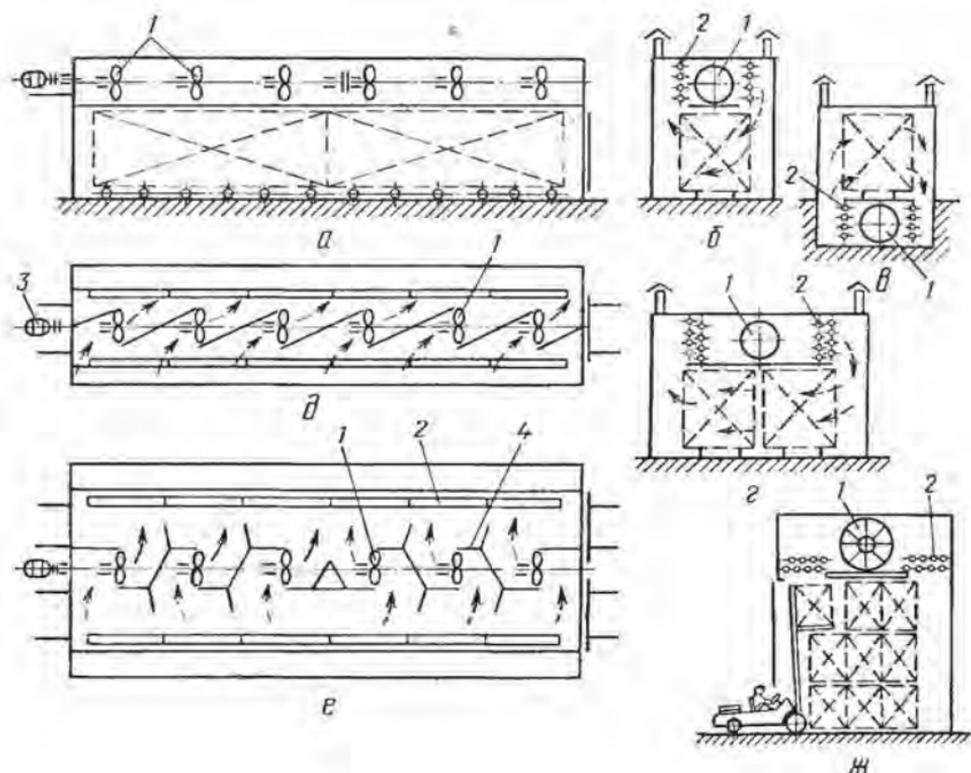


Рис. 94. Схемы сушильных камер с вентиляторами на продольных валах: а, б, в — ВИАМ-2; в, д — ВИАМ-1; а, г, е — ЦНИИМОД-23; ж — фирмы «Мур»; 1 — вентилятор; 2 — калорифер; 3 — электродвигатель; 4 — экраны

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 неопределимая 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 Гипродревпромом, 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 смещения 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 одноштабельную 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 — воздухопроводы, 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 попеременно действующими высоконапорными вентиляторами ВОК-1,0 (рис. 95, з) 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

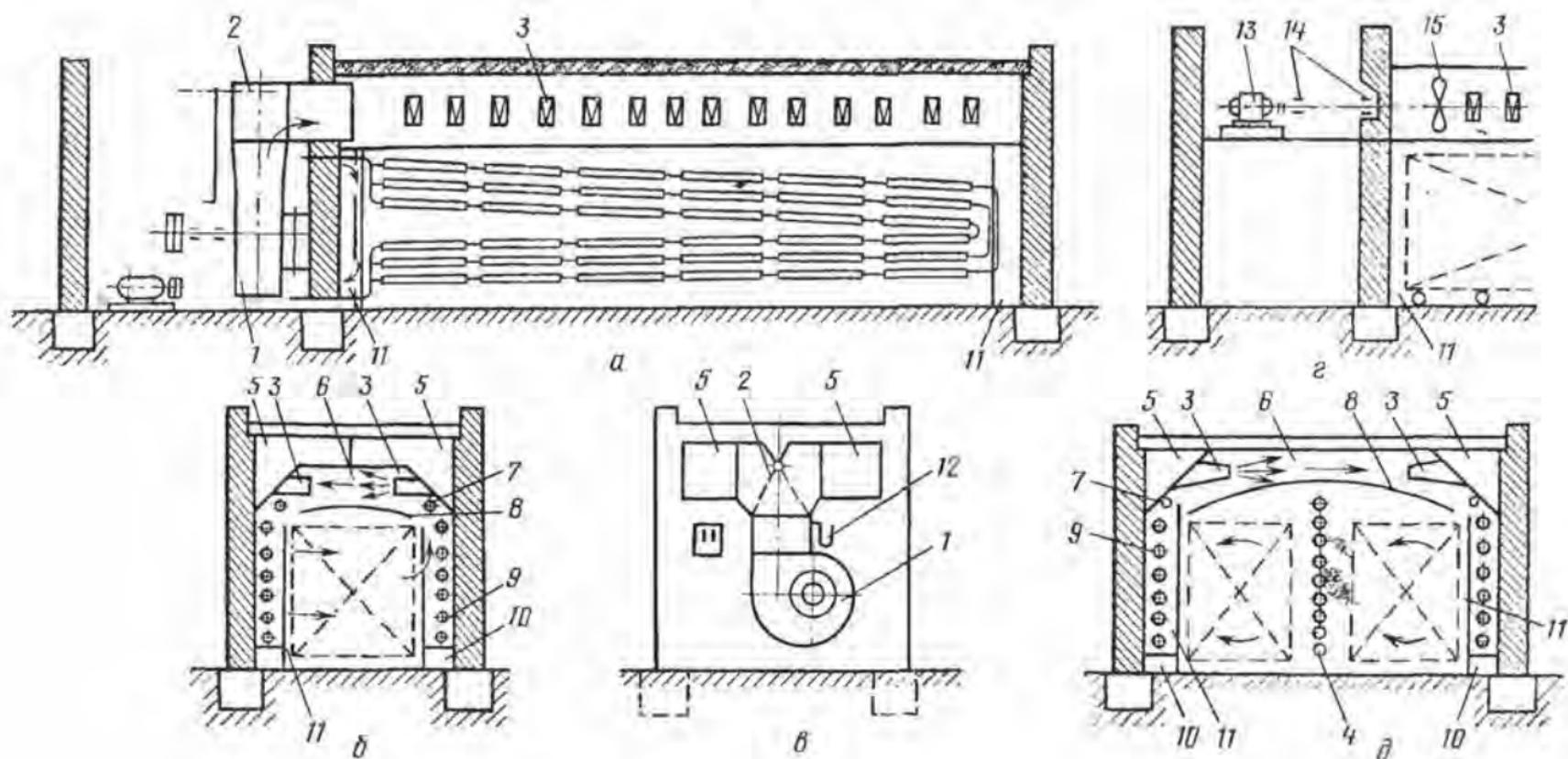


Рис. 95. Эжекционно-реверсивная сушильная камера:

а, б, в — с центробежным вентилятором; г — с осевыми вентиляторами; д — четырехштабная камера: 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 — электродвигатель 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 — нор-

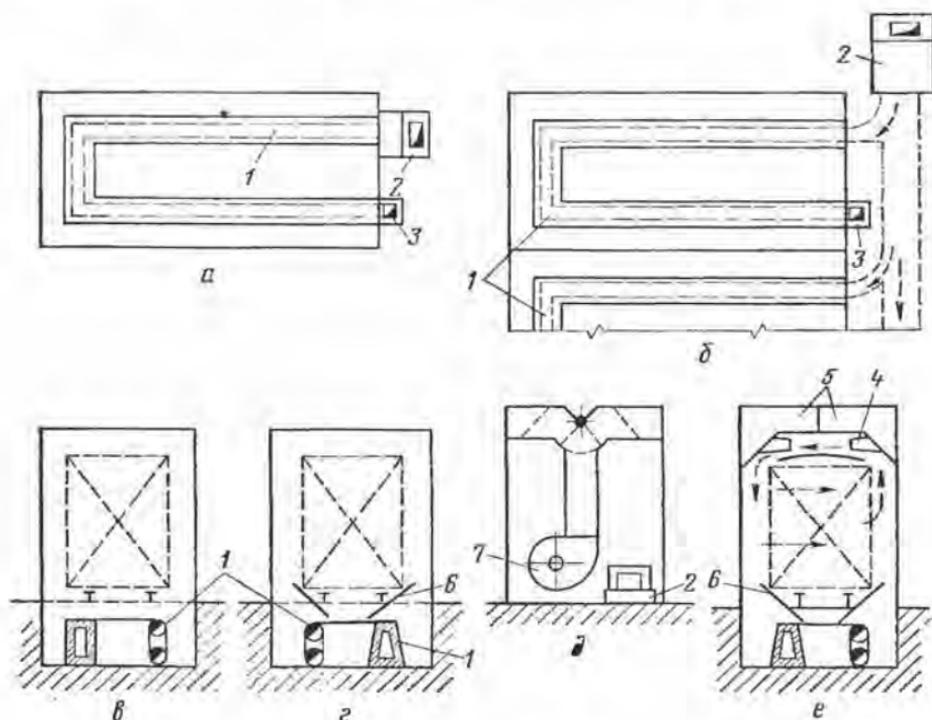


Рис. 96. Схемы боровных сушильных камер:

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 — нагревательные каналы; б — экран борова; 7 — вентилятор

мальных размеров. Для обогрева камеры устраивают топку 2, боров 1, обычно закрываемый сверху наклонным экраном б 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 грушовой топки и хорошо теплоизолированном коллекторном газоходе под коридором управления. Боровные камеры с побудительной циркуляцией перспективны для широкого использования в небольших производствах.

Боровные 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 (бескалориферные) 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 увлажнительные трубы. В проектируемых камерах этого типа желательна применение вентилятора ВOK-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, з. 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-

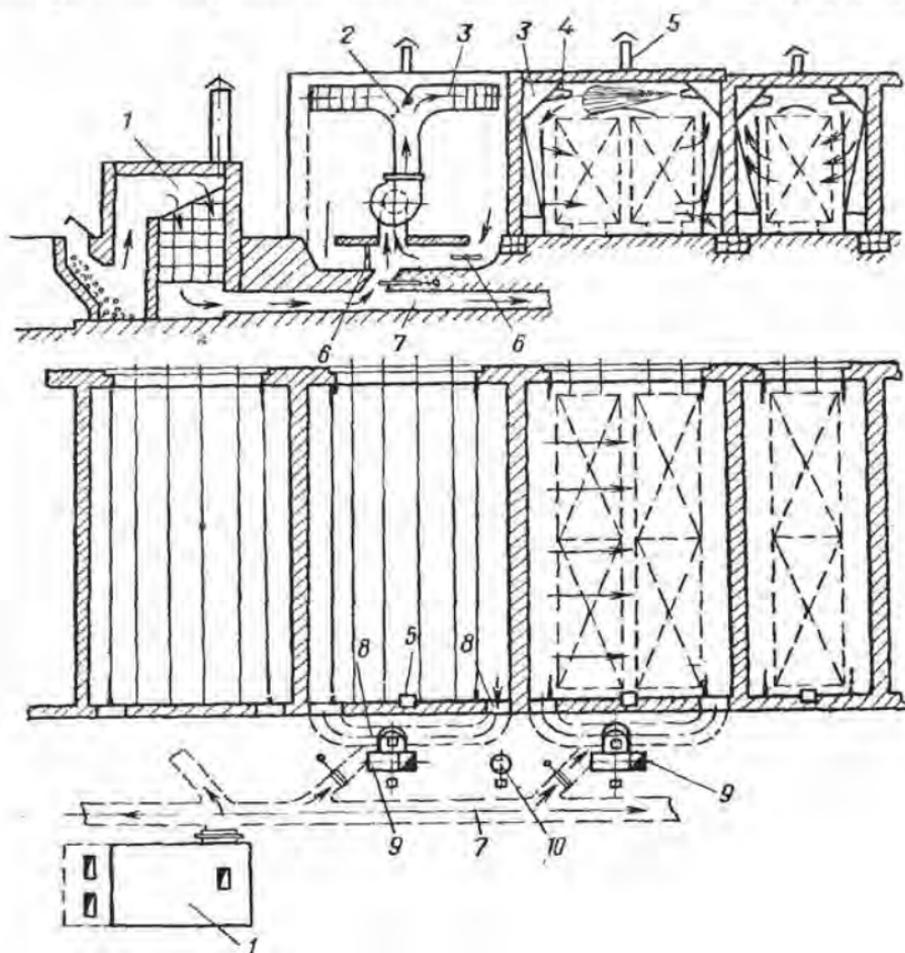


Рис. 97. Лесосушильная камерная установка на твердом топливе:

1 — топка; 2 — реверсивная заслонка; 3 — нагнетательный канал; 4 — сопло; 5 — вытяжная труба; 6 — заблокированные 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-

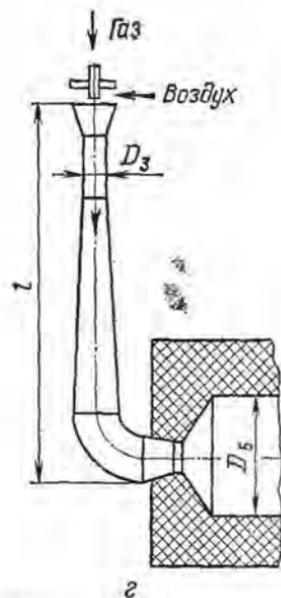
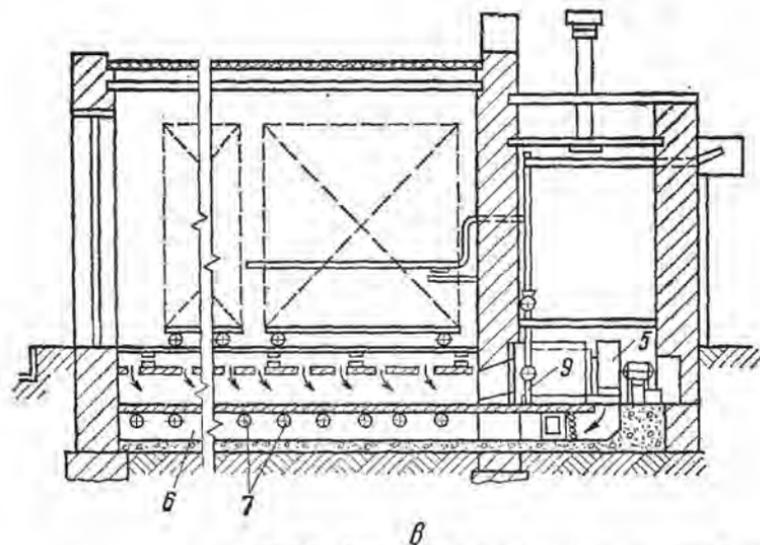
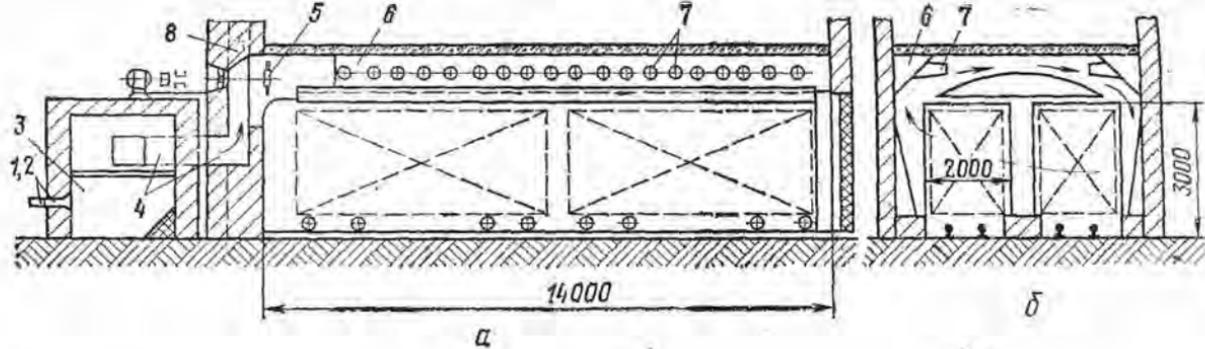


Рис. 98. Лесосушильные камеры на газообразном топливе:

а, б — с осевыми высоконапорными вентиляторами; *а* — с центробежным вентилятором; *г* — инжекционная горелка с туннельной насадкой; *1, 2* — основная и дополнительная горелки; *3* — потолок; *4* — газодух подтока; *5* — вентилятор; *6* — нагревательный канал; *7* — сошла; *8* — вытяжная труба; *9* — туннельная насадка

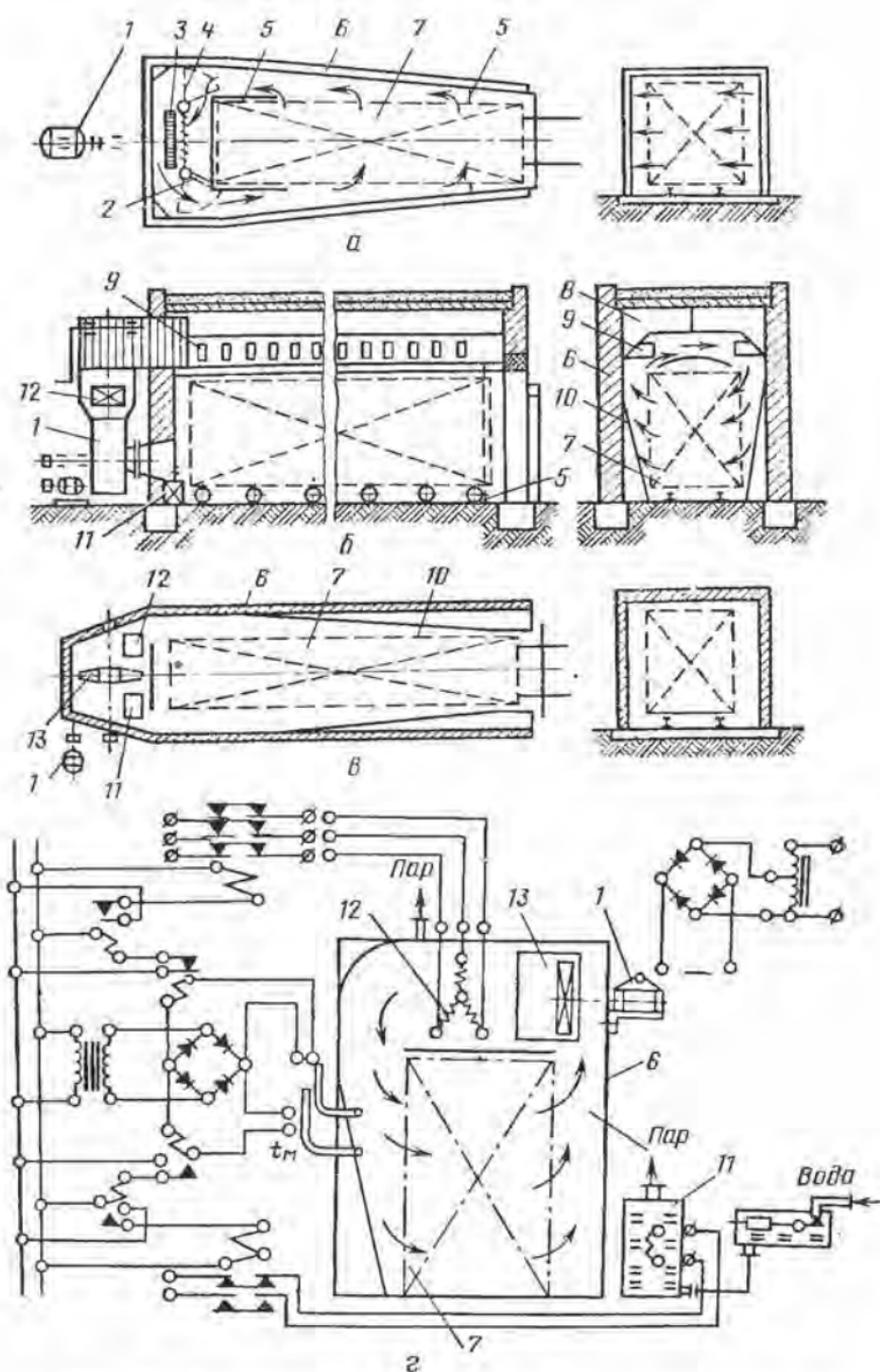


Рис. 99. Лесосушильные камеры с электрическим нагревом.

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 — нагревательный канал; 9 — сопла; 10 — экран; 11 — электрокипятильник; 12 — электрокалофер; 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 экранизации концевых его участков.

Если на предприятии нет пара и природного газа, а устройство и эксплуатация боровных 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 влаготеплообработки 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 туннели

Лесосушильные туннели 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.

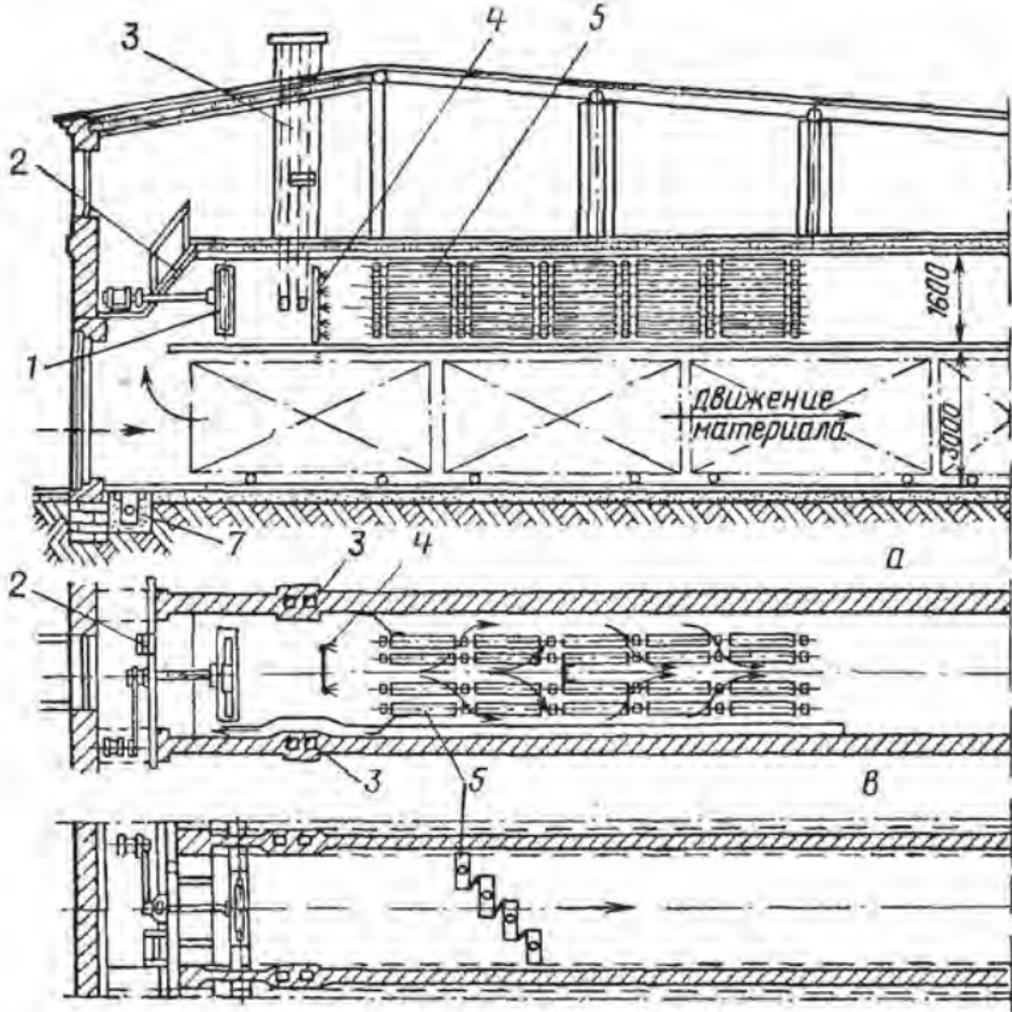
Материал укладывают со шпациями, необходимыми в данной системе для продольного перемещения воздуха вдоль досок; в этом коренной недостаток рассматриваемой системы сушильного туннеля.

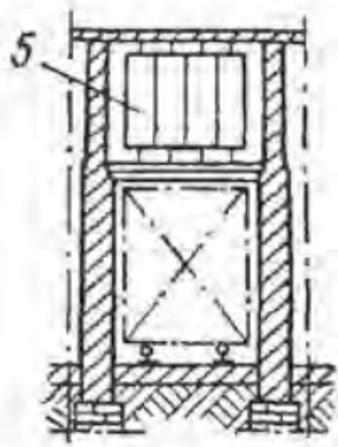
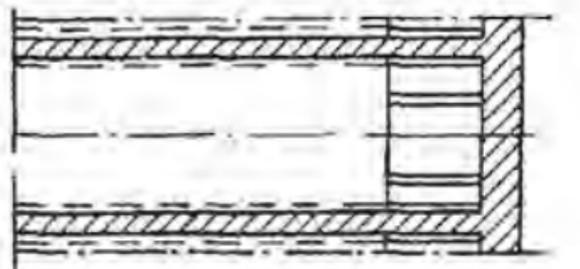
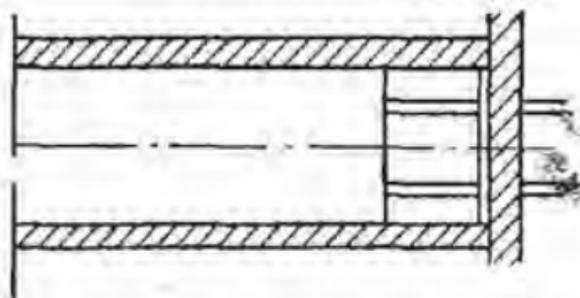
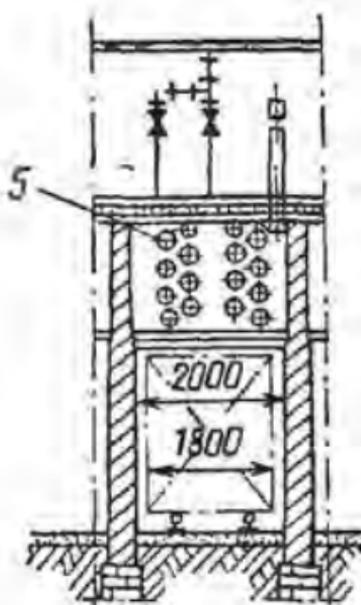
Для высушивания заготовок длиной до 2 м запроектированы аналогичные, но более короткие (16 м внутри) противоточные сушильные туннели ЦНИИМОД-26 с пластинчатыми калориферами и ЦНИИМОД-27 с калорифером из чугунных ребристых труб (см. рис. 100). Ширина дверного проема туннелей 2 и высота 2,5 м. При поперечной укладке по отношению к длине туннеля заготовки размещают в штабеле без шпаций, поэтому воздух движется вдоль прокладок — единственно 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:

а, б, в — с чугунными ребристыми трубами ЦНИИМОД-25, -27, -29; г, д — 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





В

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-

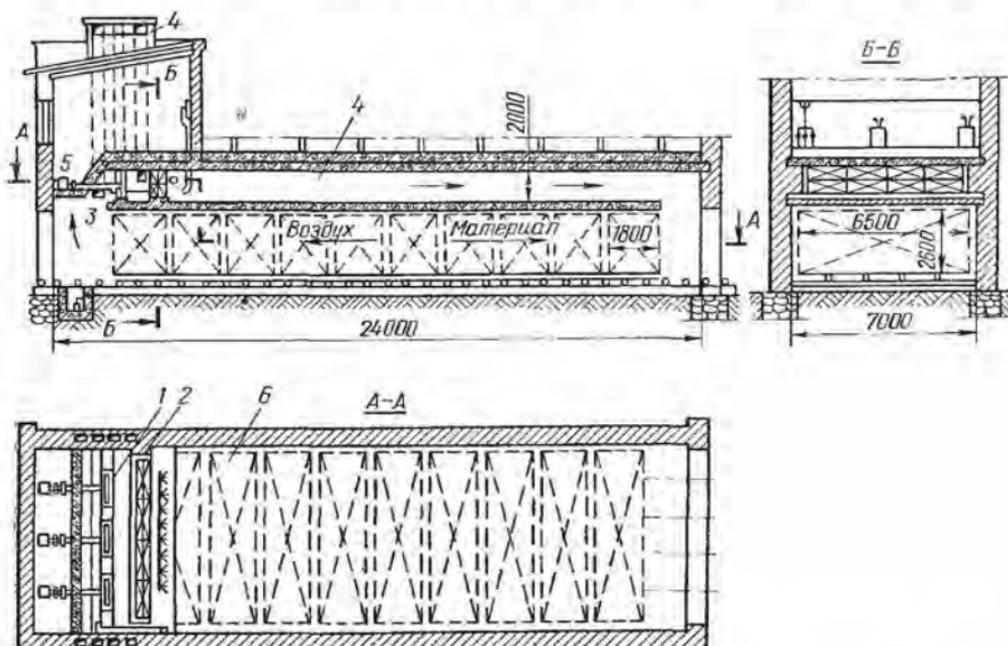


Рис. 101. Сушильный туннель ЦНИИМОД-56 с поперечной загрузкой пиломатериалов:

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 тунNELях 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).

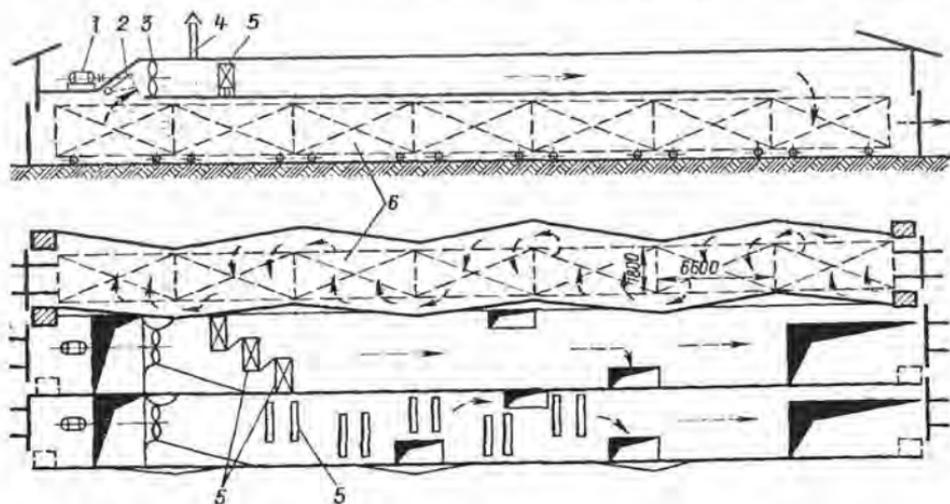


Рис. 102. Схема сушильного туннеля с зигзагообразной реверсивной циркуляцией воздуха по материалу (И. В. Кречетов):

1 — электродвигатель; 2 — заслонка 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.

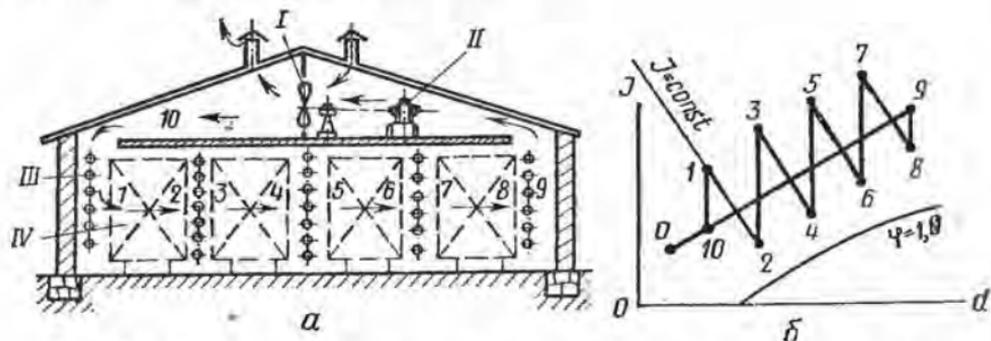


Рис. 103. Сушильная установка с промежуточным подогревом воздуха: I — вентилятор; II — электродвигатель; III — калорифер; IV — высушиваемый материал

Теоретический процесс сушки материала с промежуточным подогревом воздуха показан на рис. 103, б. Точки 1, 2, 3 и т. д. параметров воздуха на td -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 Латгипропромом 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 лесокombинатах 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, смонтированным 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-

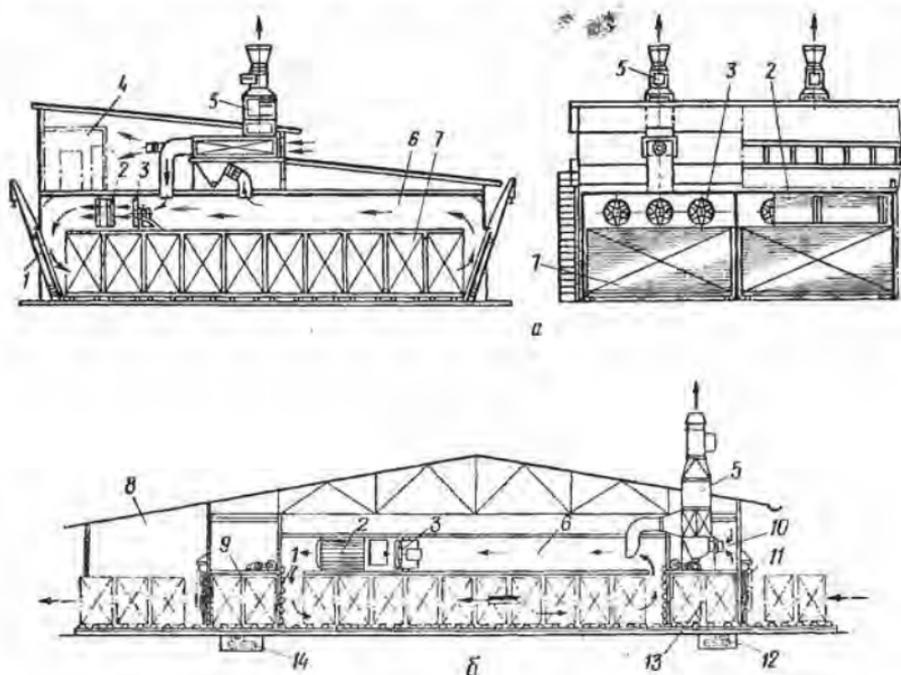


Рис. 104. Сборные металлические сушильные туннели с поперечной загрузкой штабелей:

а — «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 закатки штабелей; 13 — загрузочная зона; 14 — механизм выкатки штабелей

держивается на заданном уровне автоматически. В качестве теплоносителя в калориферы подают воду с температурой около 120°C , 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 противосточных туннелях ЦНИИМОД-24 — ЦНИИМОД-25), поскольку циркуляция сушильного агента направлена по длине пилломатериалов.

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; вытекающая из сопел со скоростью около 40 м/с, этот газ эжектирует отработанный сушильный агент. Получившийся таким образом рабочий сушильный агент проходит через диффузор эжектора,

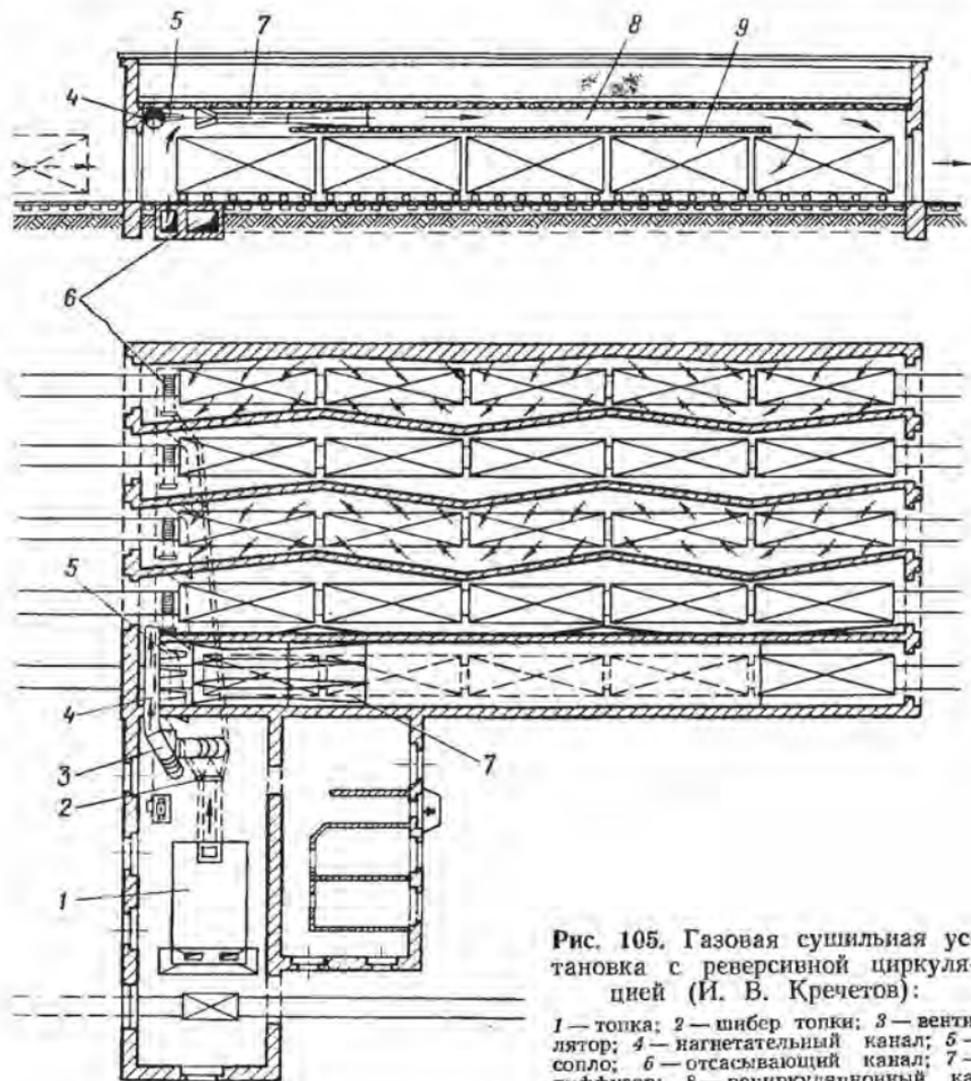


Рис. 105. Газовая сушильная установка с реверсивной циркуляцией (И. В. Кречетов):

1 — топка; 2 — шибер топки; 3 — вентилятор; 4 — нагнетательный канал; 5 — сопло; 6 — отсасывающий канал; 7 — диффузор; 8 — рециркуляционный канал; 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 оставшая 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 подвала или высота верхнего канала, м	Объем* загружаемого материала $V = 50 \text{ мм}$, м ³	Годовая провозводи- тельность, усл. тыс.м ³	Площадь поверх- ности нагрева калори- фера, м ²	Вентиляторы			
								Количество	Тип и размер	Частота враще- ния, об/мин	Мощность электро- двигателя, 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 × 6
МТИ-1 и МТИ-3	1	7	3,1	1,4	15	1,5	P-240	3	У12Р-№ 12,5	860	4,0 × 3
МТИ-2 и МТИ-4	2	14	3,1	1,4	30	3,0	P-480	6	У12Р-№ 12,5	860	4,0 × 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
Гипродрев — ЛТА	4	14	5,6	1,5	60	8,0	ПиР-960	6	У12Р-№ 10	1200	4,0 × 6
СПВ-62	1	7	3,0	1,5	15	2,0	П-325	4	У12Р-№ 10	1200	4,0 × 4
СПВ-65	1	7	3,1	1,5	15	2,0	П-325	3	У12Р-№ 12,5	900	5,5 × 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 × 6
СПЛК-2	2		5,8	—	30	3,0	P-350	2	У12Р-№ 12	960	5,5 × 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 Реку- пера- тор 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 смещения 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 смещения эжектора (диаметром 700 мм); д) улучшение экранизации штабелей по их периметру; е) отрегулировка работы топки со стабильным получением бездымных продуктов сгорания [13].

Лучшее топливо для газовых сушильных туннелей — природный газ, затем сырая дробленка. Во ВНИИДМАСе 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 пластинчатыми 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 теплотерь в зимних условиях работы), а также перфорированных труб, расположенных продольно по одной

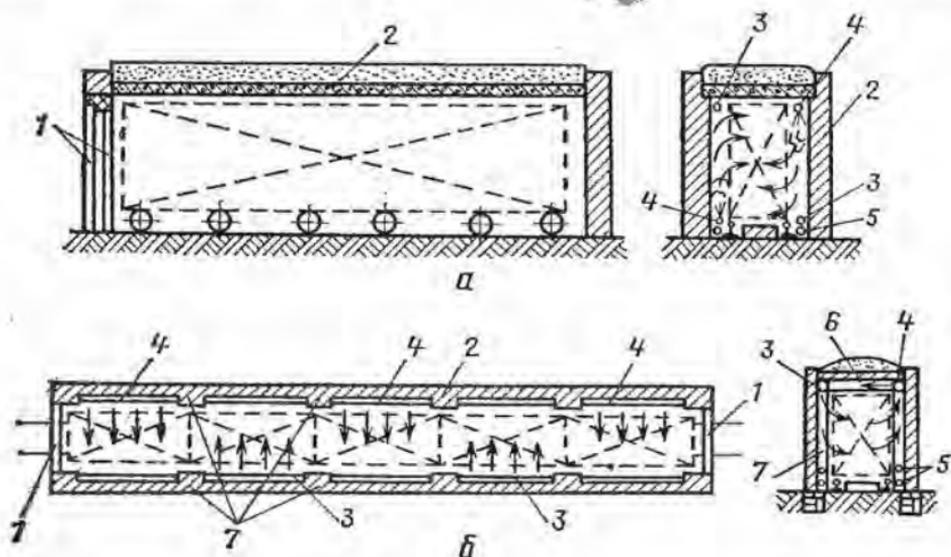


Рис. 106. Установки для кондиционирования пиломатериалов:

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

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 вентилях 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 пилястры, 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 пароматриалли. 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 древесины.

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 поддерживать 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 стrowтельные 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 толща будет более сухой и, следовательно, менее теплопроводной.

Стены стационарных камер обычно кладут кирпичные на смешанном, желательном 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 $1,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ [$1,3 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})$] и заменить на новые.

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

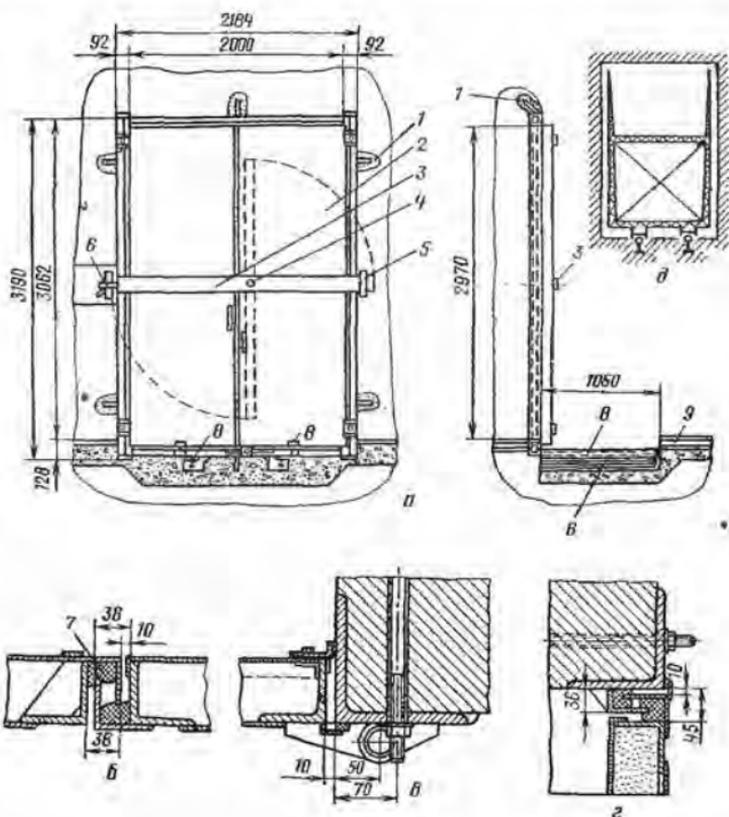


Рис. 107. Дверь конструкции ВПКТИМ:

а — общий вид; б — средний створ; в — боковой створ; г — верхний створ; д — штабелный 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 $2 \times 3 \text{ м}$, 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 сырые 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, а 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 устроены три последовательных вертикальных канала с перевальными 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/м^2 [$(300 \text{ Мкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}))$], а при полусухом — 470 кВт/м^2 [$(400 \text{ Мкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}))$], что соответствует сжиганию около 150 кг/м^2 древесного топлива в час. Напряжение топочного пространства принимают $290\text{—}350 \text{ кВт/м}^3$ [$250\text{—}300 \text{ Мкал}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$]; при сыром топливе это соответствует его расходу 120 кг/м^3 в час. В топке, показанной на рис. 108, а 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 пиломатериалов 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, а) над сводиками 4 добавляют воздух, поддерживая загрузочную часть топки все время заполненной топливом.

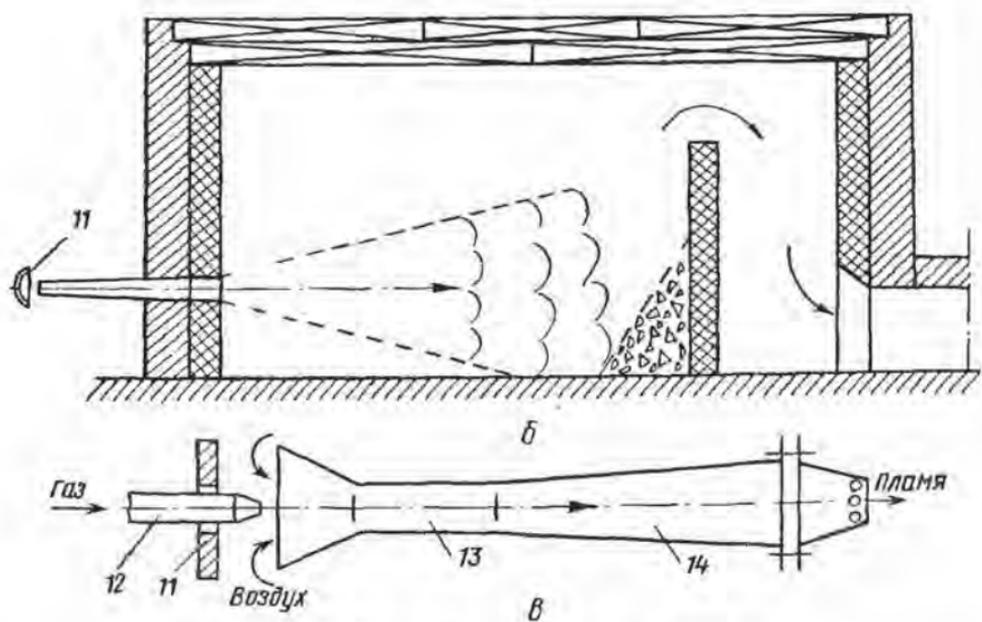
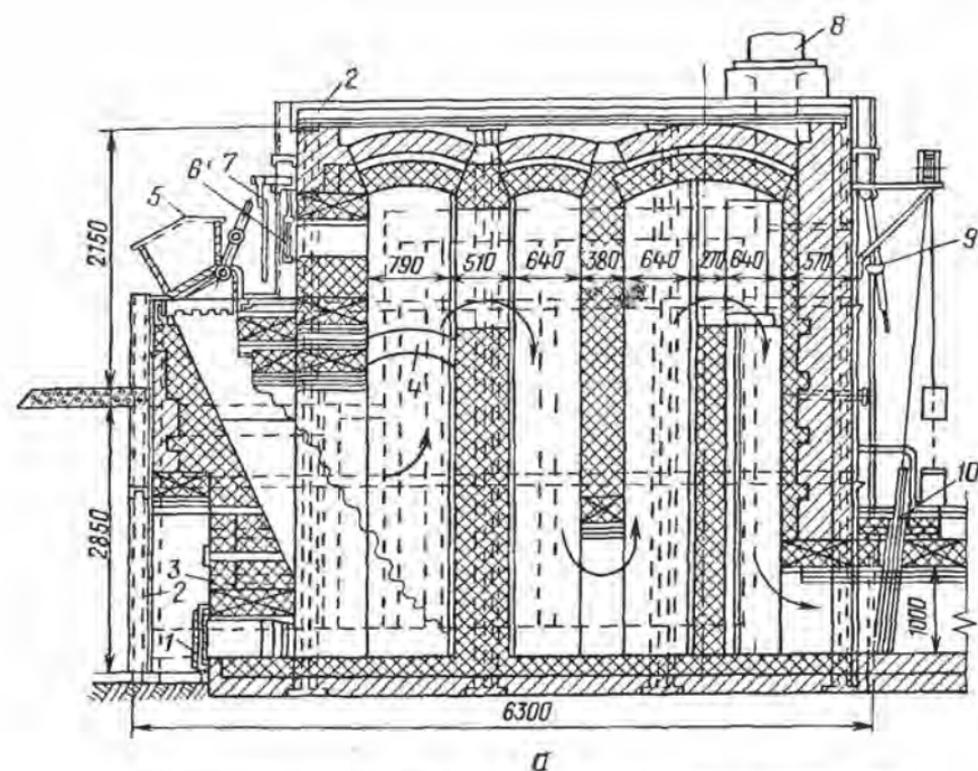


Рис. 108. Топки и инжекционная горелка:

а — полугазовая топка для дробленых древесных отходов; б — подтопок для сжигания природного газа; а — 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 сдвижной экран; 8 — растопочная труба; 9 — рукоятка шиберы 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 приготовлен на месте путем обдирки на точильном кругу (а не отески). Кирпичи свода кладут впритирку с толщиной швов до 1 мм. Распорные горизонтальные балки свода не приваривают 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 подосу 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. Шиберы и их рамки — чугунные, предпочтительнее керамические (стальные не допускаются). Иногда их набирают из огнеупорных кирпичей.

Топки и калориферы боровных камер

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

Расход не крупного 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-

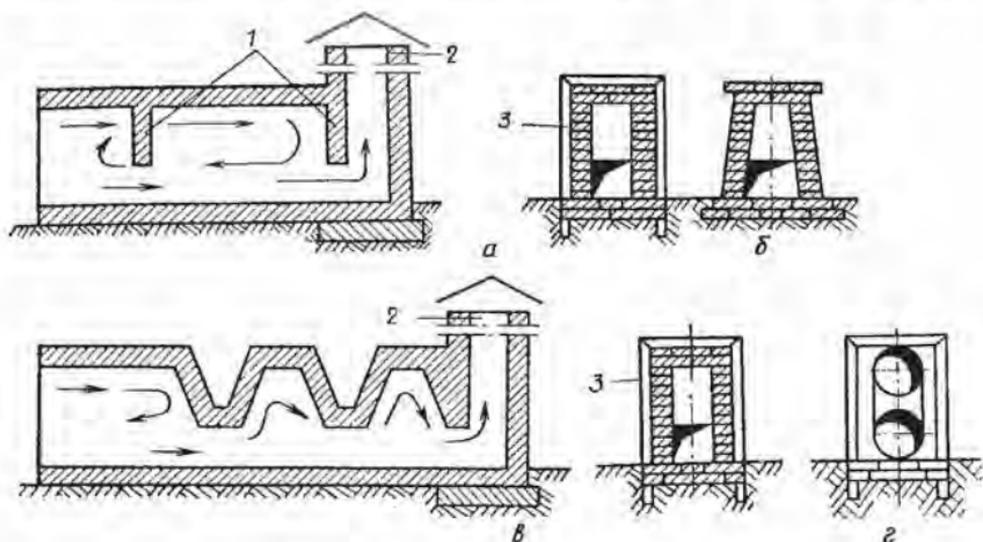


Рис. 109. Огневые калориферы:

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

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

В формуле теплопередачи (для однослойной 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-

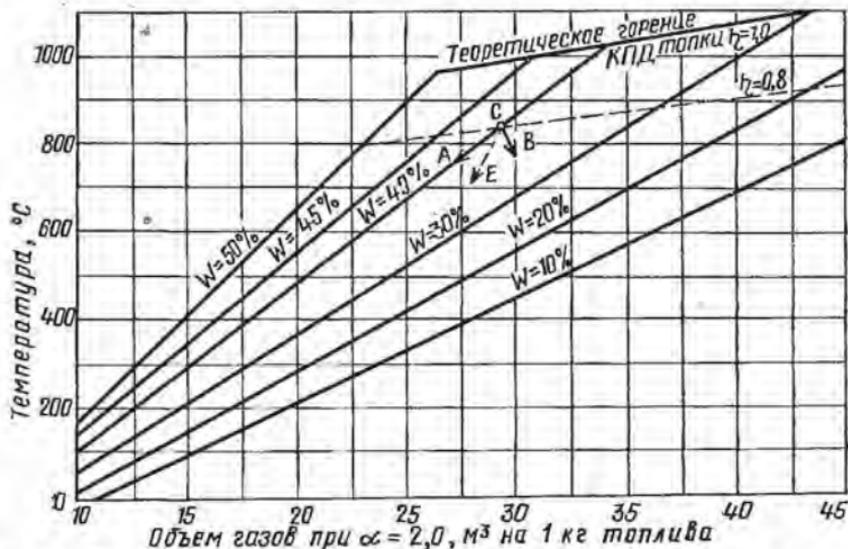


Рис. 110. Объем продуктов сгорания 1 кг древесного топлива при $\alpha=2,0$:

A — вектор охлаждения газов стенками калорифера; B — вектор подсоса 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 стенках толщиной 1, $3/4$ и $1/2$ 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 $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{ккал}$).

В огневом кирпичном калорифере большое термическое сопротивление оказывает толща кирпичной стенки b/λ , при ее толщине в $1/2$ кирпича b/λ — 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, желательнее 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 его 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 непрерывного уклона ребристых и отводящих труб часть калорифера может быть залита конденсатом и выключится. К последней ребристой трубе отводящую 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_n — средняя температура теплоносителя (греющего пара, воды); t — средняя температура нагреваемого воздуха; c — коэффициент запаса, принимаемый 1,1—1,3 (больше для пластинчатых калориферов).

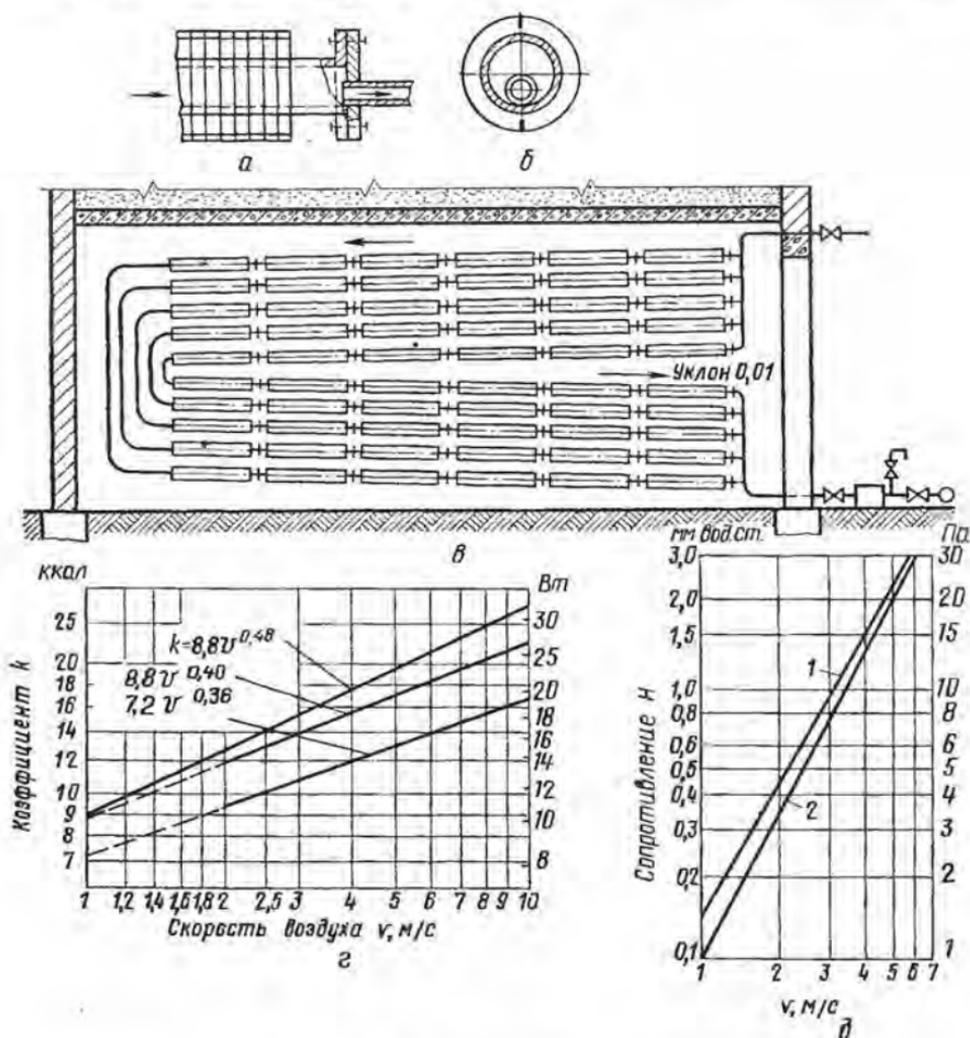


Рис. 111. Калорифер из круглых ребристых труб:

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

$$k = 1,163(t_n - t)^{0,4} [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})] = (t_n - t)^{0,4} [\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})]. \quad (220)$$

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

$t_n - t, ^\circ\text{С} . . .$	100	90	80	70	60	50	40	30
$k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) . .$	7,2	7,0	6,8	6,4	6,4	5,6	5,1	4,5
$k, \text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})$	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 $t = 0^\circ\text{С}$ и давлении 101 325 Па (760 мм рт. ст.).

При последовательной по ходу воздуха установке рядов труб

$$k = 10,2v^{0,4} [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})] = 8,8v^{0,4} [\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})]; \quad (222)$$

при шахматной установке труб

$$k = 10,2v^{0,48} [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})] = 8,8v^{0,48} [\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})]; \quad (223)$$

для одиночной трубы

$$k = 8,4v^{0,36} [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})] = 7,2v^{0,36} [\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})]. \quad (224)$$

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 тепломощности. Он состоит из нескольких рядов параллельных трубок, объединенных на каждом их конце общей коробкой для подвода в трубки свежего и отвода отработанного теплоносителя. На трубки напрессованы пластинки толщиной 0,5 мм с шагом в свету 5 мм. Пластинки нагреваются от трубок и передают тепло воздуху, принудительно продуваемому между пластинками, 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 $\rho=101325$ Па

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

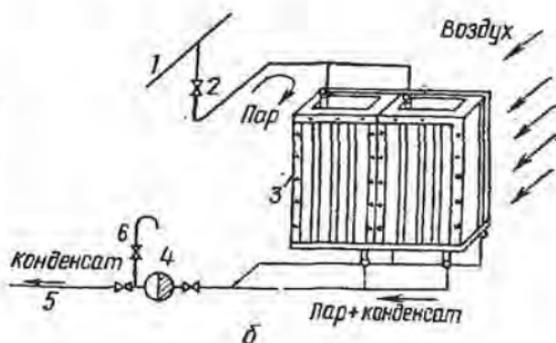
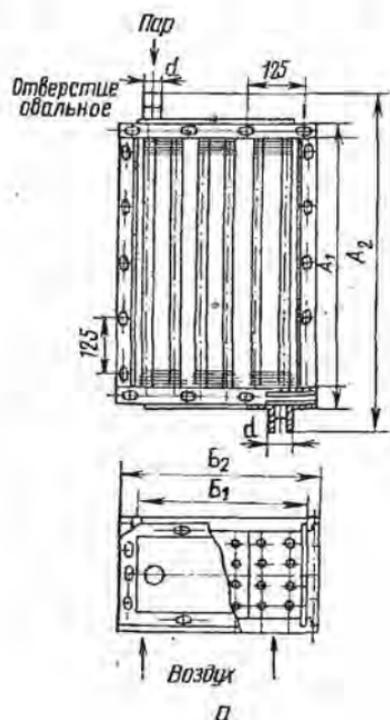


Рис. 112. Пластиновые калориферы:

a — 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, a) № 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, a) № 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 ρv .

18. Технические характеристики пластинчатых калориферов КВБ

№ калорифера	Площадь поверхности нагрева, м ²	Площадь живого сечения воздуха, м ²	Присоединительные размеры, мм (см. рис. 112)				Диаметр патрубков d, дюймы	Масса, кг
			A ₂	B ₂	A ₁	B 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 v_p , кг/(м ² · с)	Коэффициенты теплопередачи, K, Вт/(м ² · К) [ккал/(м ² · ч · °С)]	Сопротивление калориферов проходу воздуха, Па (мм вод. ст.)	Массовая скорость воздуха v_p , кг/м ² · с	Коэффициенты теплопередачи K, Вт/(м ² · К) [ккал/(м ² · ч · °С)]	Сопротивление калориферов проходу воздуха, Па (мм вод. ст.)
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 смещения трубок (тип КФ) и без рифления пластинок, к тому же способствующих их засорению древесной пылью.

В туннелях воздух подогревают на $20-30^\circ\text{C}$, 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, смещение 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 снизится 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 непрерывно подается пар из паромангистрала, а из него должно вытекать такое же (по массе) количество конденсата. Пар должен находиться в калорифере под давлением, чтобы его температура была выше 100°C .

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, в). Таким образом, конденсатоотводчик является сепаратором, а не конденсатором. Существуют разнообразные конструкции конденсатоотводчиков: гидростатические (поплавокные), 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 всплывает и закрывает находящееся в крышке 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.

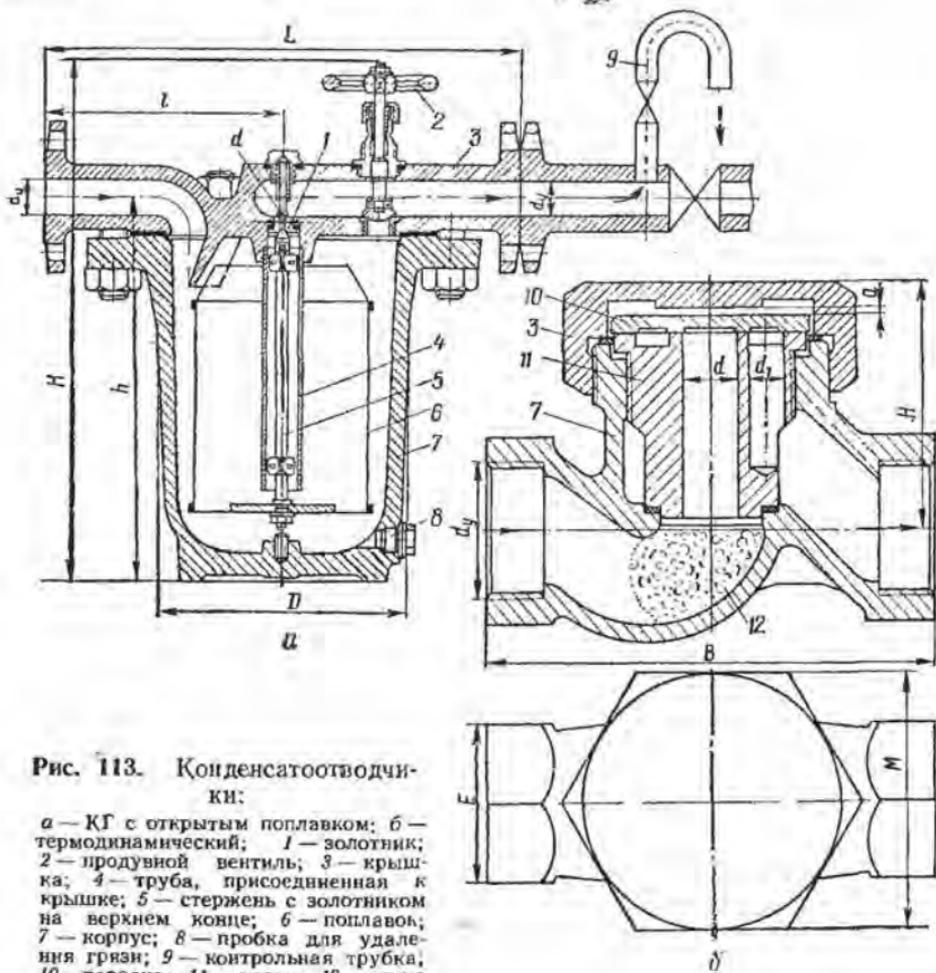


Рис. 113. Конденсатоотводчик:

a — КГ с открытым поплавком; *б* — 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 вентилям (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

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

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 конденсатоотводчика	Расход, кг/ч	Условный проход d_y , мм	Масса, кг	Размеры по рис. 113,а, мм					
				L	l	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 проход 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	d ₁
15	120	140	170	184	214	0,9	80	55	55	30	2,0	8,5	6
20	200	280	375	415	470	1,0	100	61	60	36	2,0	10	7
25	390	460	585	670	730	1,7	120	68	65	46	2,0	12	8,5
32	450	678	725	872	970	1,8	140	79	85	55	2,5	17	11
40	500	700	790	910	1035	3,6	170	94	95	60	3,5	20	14
50	750	1150	1420	1710	1800	5,3	200	110	105	75	4,0	26	16

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:

$$L = 0,785d^2v3600/1000 = 2,82d^2v = 32d^2(p_1 - p_2). \quad (227)$$

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 энтальпию 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 энтальпия 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 трубки диаметром 10—16 мм, длиной в развернутом виде 1—2,5 м, в слое электроизоляции которой запрессована нихромовая 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 изготовляют 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 изготовляют 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.

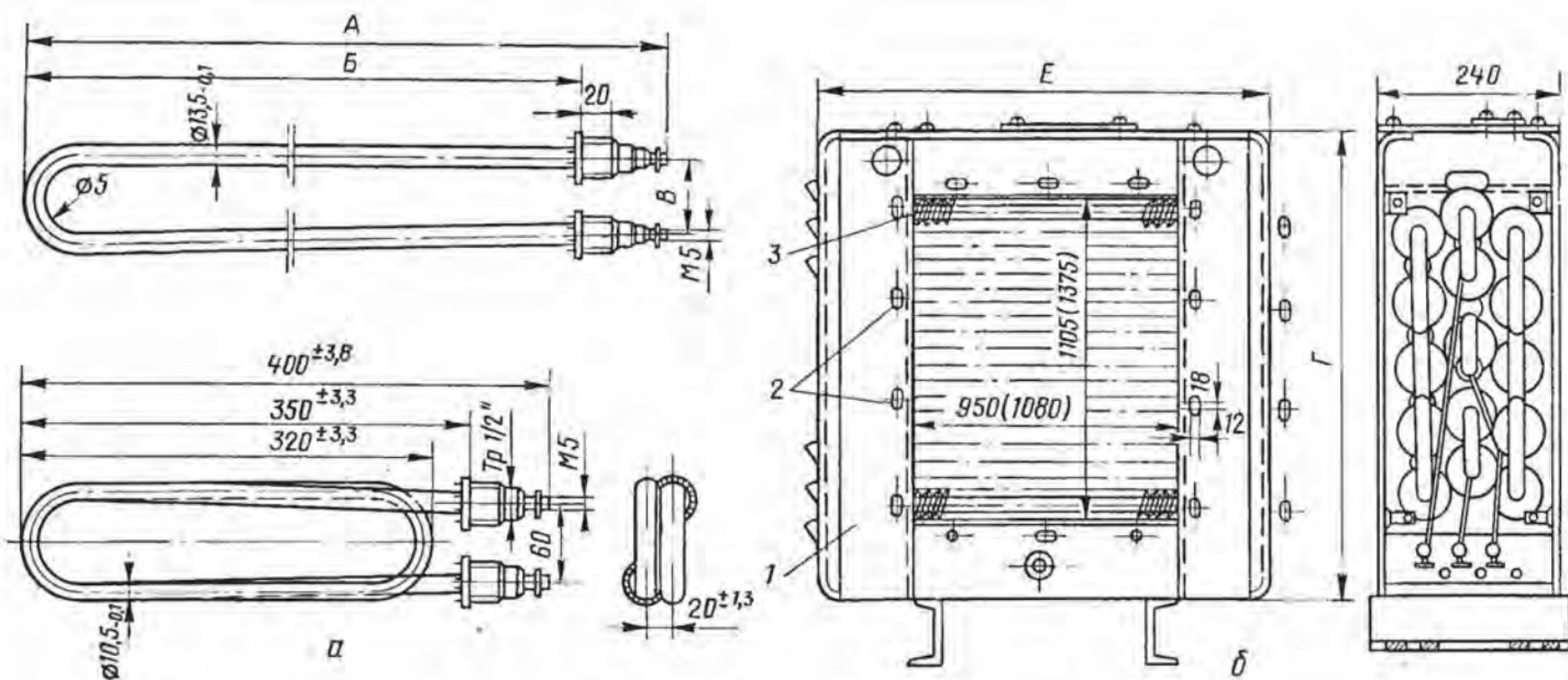


Рис. 114. Электрокалориферы:

а — трубчатый электронагреватель (ТЭН); б — электрокалорифер СФО: 1 — корпус; 2 — связи; 3 — трубчатый нагревательный элемент

**22. Характеристики электрических калориферов серии СФО
Наманганского трансформаторного завода**

Наименование показателя	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) <i>E</i> (см. рис. 114, б), мм	600	720	840	960	1200	1320
Высота (габаритная) <i>Г</i> , 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 рабочей элемент вентилятора — колесо. Размеры вентилятора определяются его номером, выражающим 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 противодействия 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.

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.

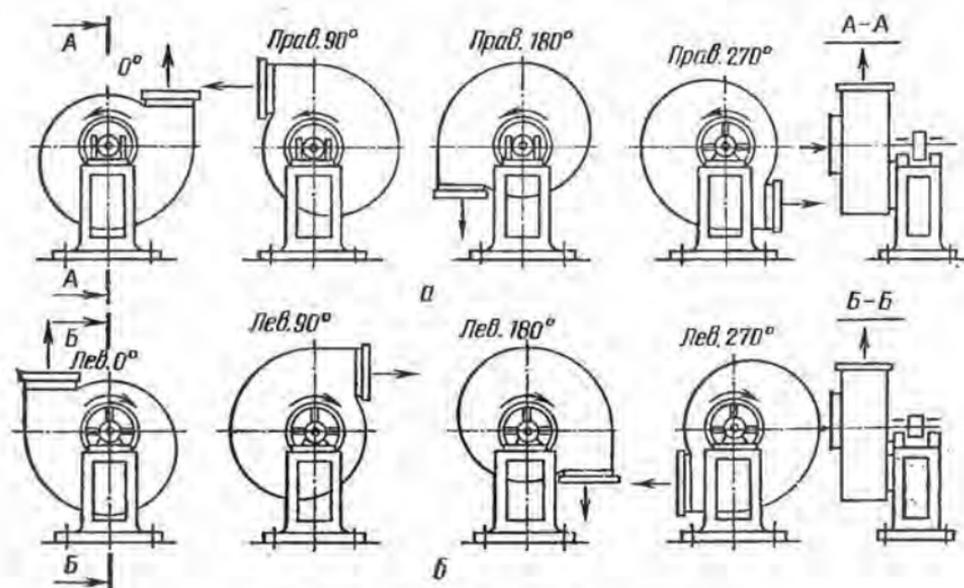


Рис. 115. Центробежные вентиляторы:

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 быстротходности.

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°C . 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 изготовляют 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 совмещенных нижних шкалы).

Характеристика вентиляторов Ц4-76 (пустотелыми 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

$$N = VH / (1000 \cdot 3600 \eta),$$

$$[\text{или } VH' / (102 \cdot 3600 \eta)], \quad (231)$$

где H или H' — фактическая разность давлений перемещаемого вентилятором воздуха, соответственно, Па или мм вод. ст.; V — часовая его подача, м³/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 $0,9 \text{ кг/м}^3$, в объеме $50 \text{ тыс./(м}^3 \cdot \text{ч)}$ и полном давлении 1050 Па (105 мм вод. ст.). Находим приведенную плотность воздуха $1050 \cdot 1,2/0,9 = 1400 \text{ Па}$ (140 мм вод. ст.). На

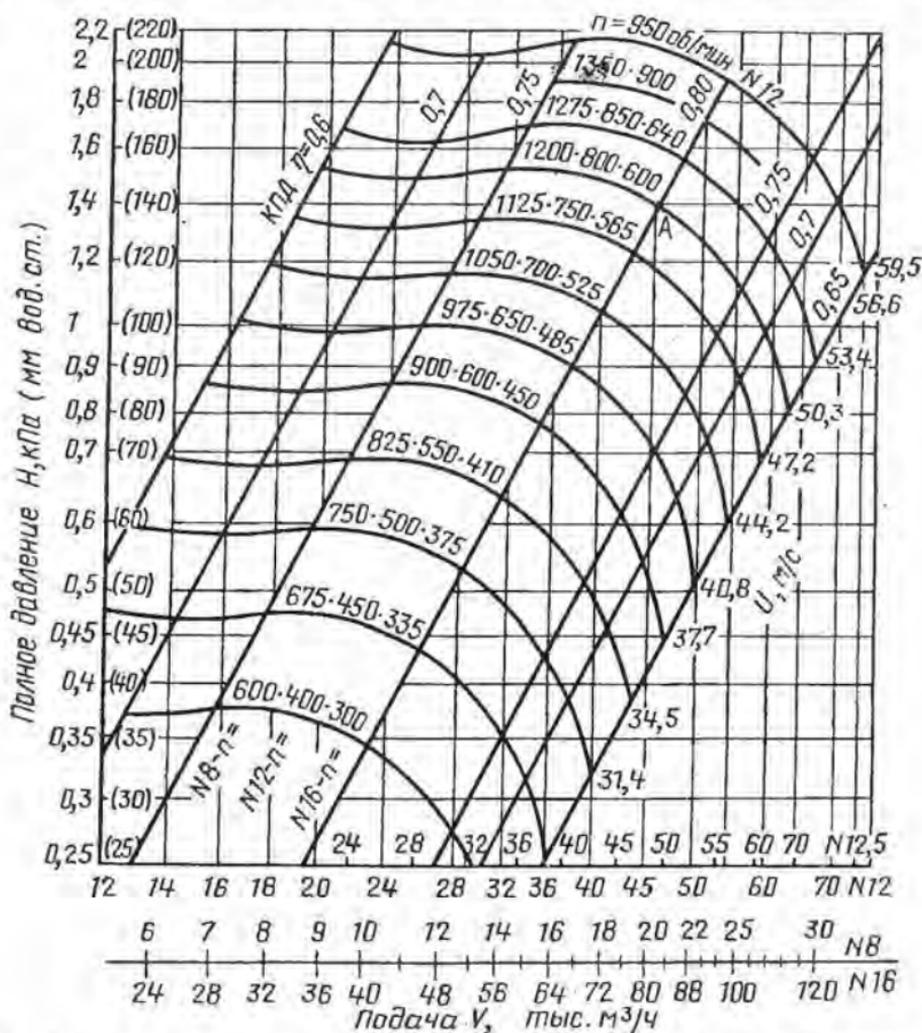


Рис. 116. Аэродинамическая характеристика центробежных вентиляторов Ц4-70

рис. 116 на прямой максимального КПД 0,8 или несколько правее ее (до линии $\eta = 0,7$) выявляем для вентилятора № 12,5 точку А 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, а, б). 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, сужающимися 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— 23° .

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—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 кож (неподвижный или вращающийся 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— 35° (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-

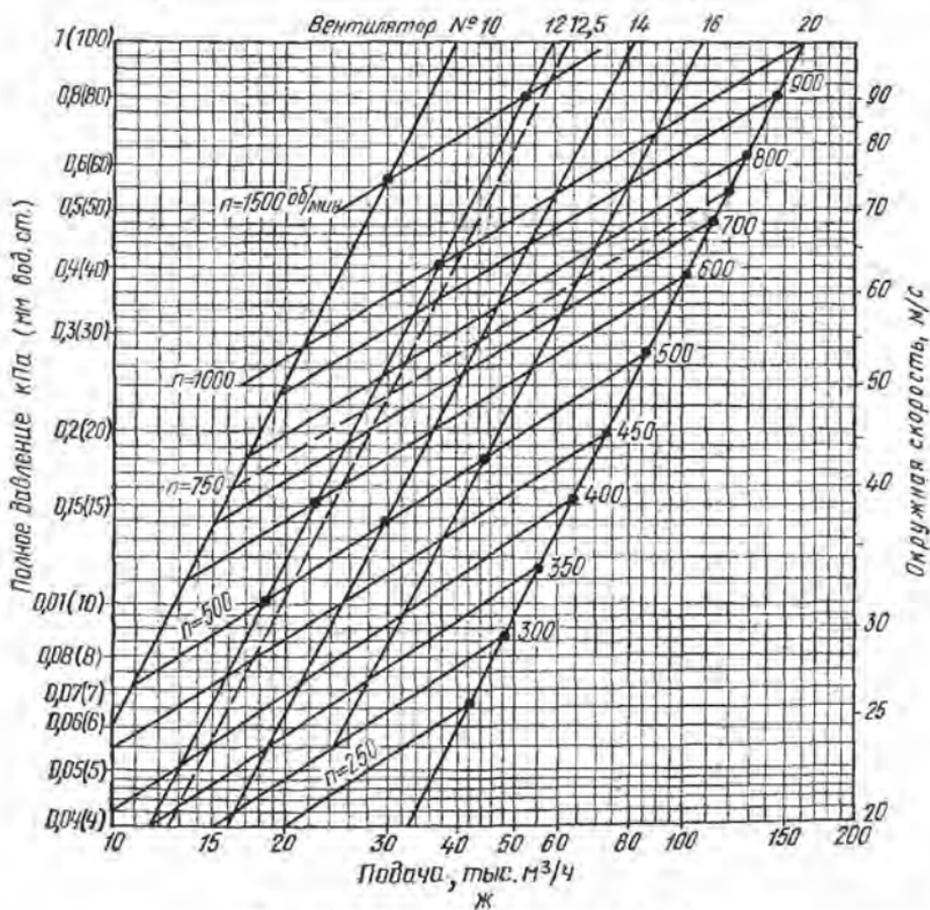
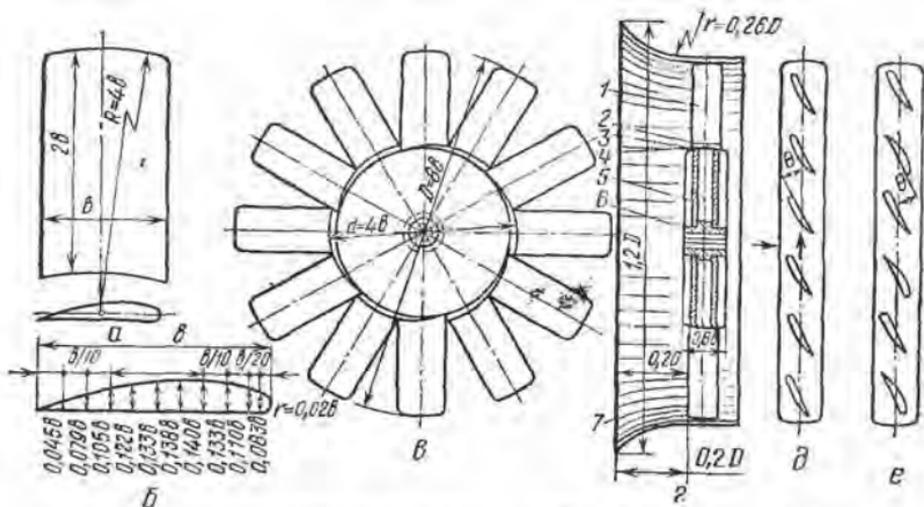


Рис. 117. Осевой вентилятор У-12:

а — лопатка вентилятора; б — профиль лопатки; в — колесо; г — поперечный разрез колеса и коллектора; д — разрезка 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.

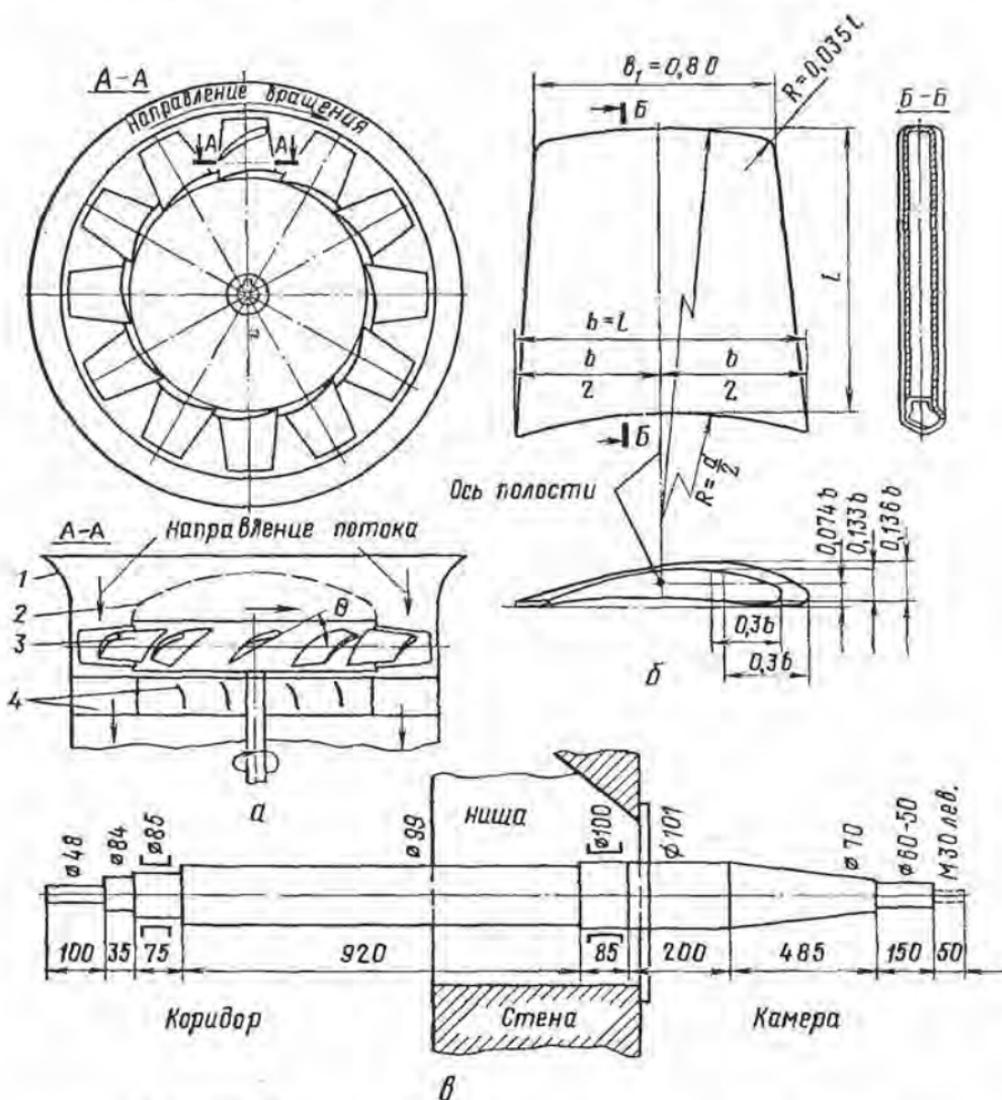


Рис. 118. Вентилятор В с коллектором и несущим валом:

а — колесо вентилятора с коллектором: 1 — коллектор; 2 — кок; 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 пустотелыми 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 крученой ло-

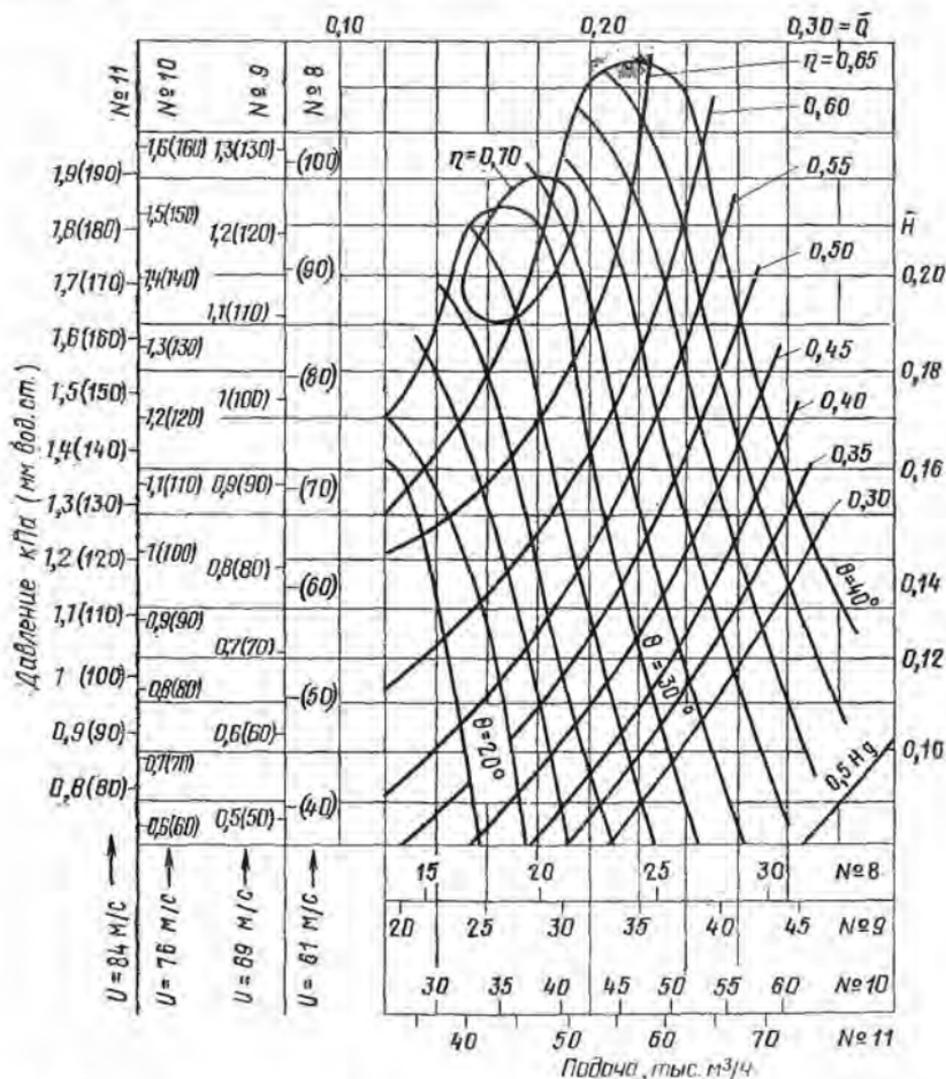


Рис. 119. Аэродинамическая характеристика вентилятора В при 1460 об/мин

патки измеряется на середине 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 налипают 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

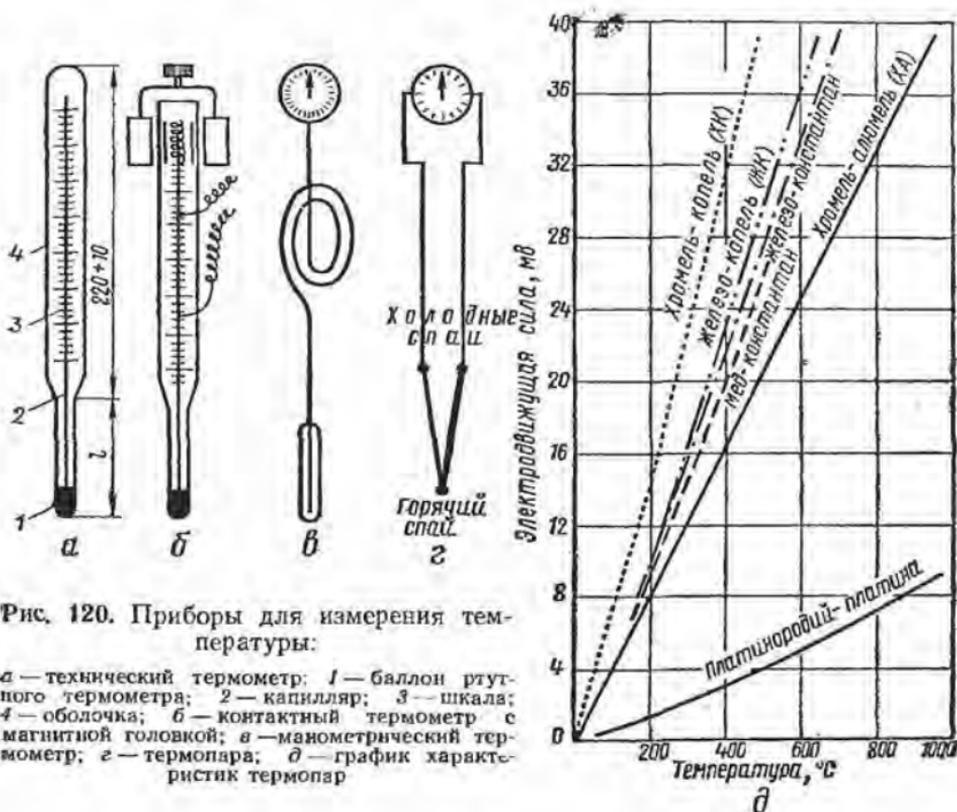
Процесс сушки древесины многообразен по физическому содержанию. Для выявления параметров и управления этим процессом необходимо пользоваться многими контрольно-измерительными и регулируемыми приборами. Далее рассмотрены основные приборы для измерения температуры, психрометрической разности, скорости 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 допустимый 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-



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 полый 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 мало надежны — 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 питаемая 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 их спаев подогреть. Для измерения электродвижущей силы, почти пропорциональной разности температур обоих спаев, в цепь включают милливольтметр или иной прибор (рис. 120, з). 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 спаев 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 термометра (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°C (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 б, 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 имеющих 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

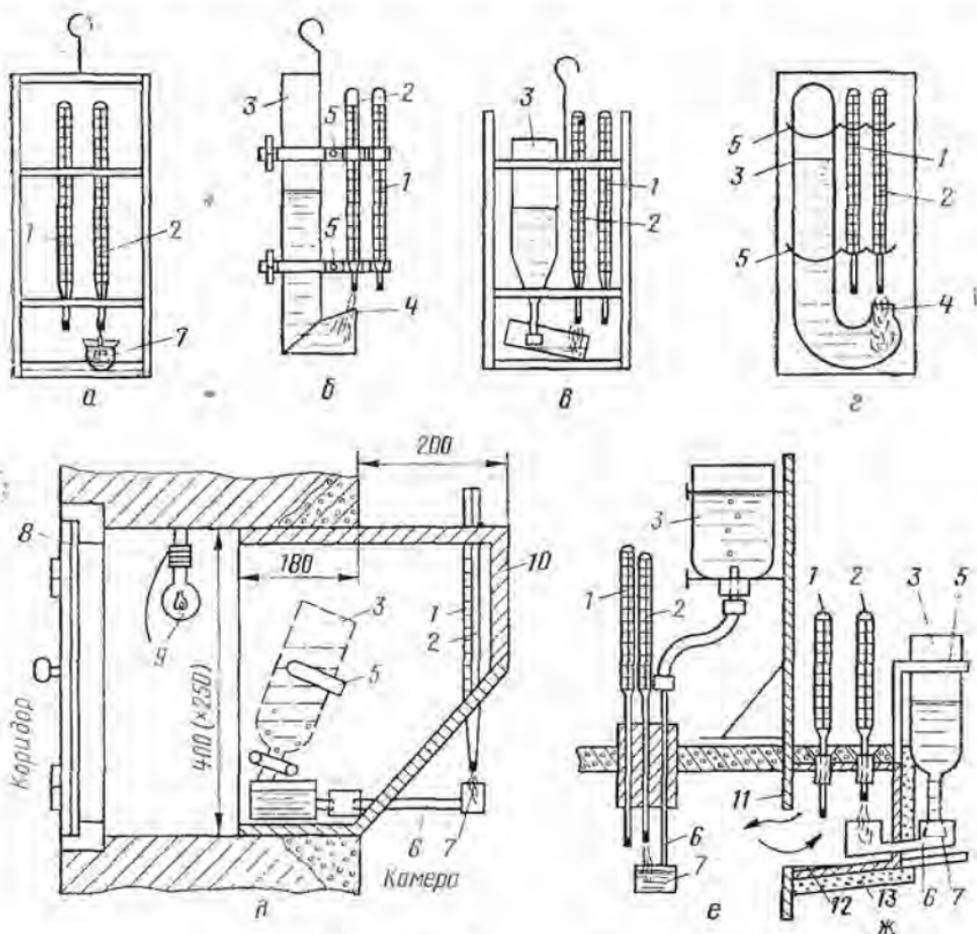


Рис. 121. Психрометры:

a — переносный со стакачиком; *б, в, з* — 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* — хомутики; *6* — трубка латунная; *7* — стакачик; *8* — дверка; *9* — лампочка; *10* — короб; *11* — стенка 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.

Вода для психрометра должна быть хорошо отстоявшаяся конденсатная, снеговая или дождевая, но лучше дистиллированная. Расстояние от поверхности воды до мокрого термометра около 30 мм. Марлей обертывают не только шарик термометра, но и участок на 30 мм выше него.

В неисправном психрометре ошибка, как правило, происходит в сторону уменьшения психрометрической разности, что ведет к форсированию процесса сушки по сравнению с заданным по режиму.

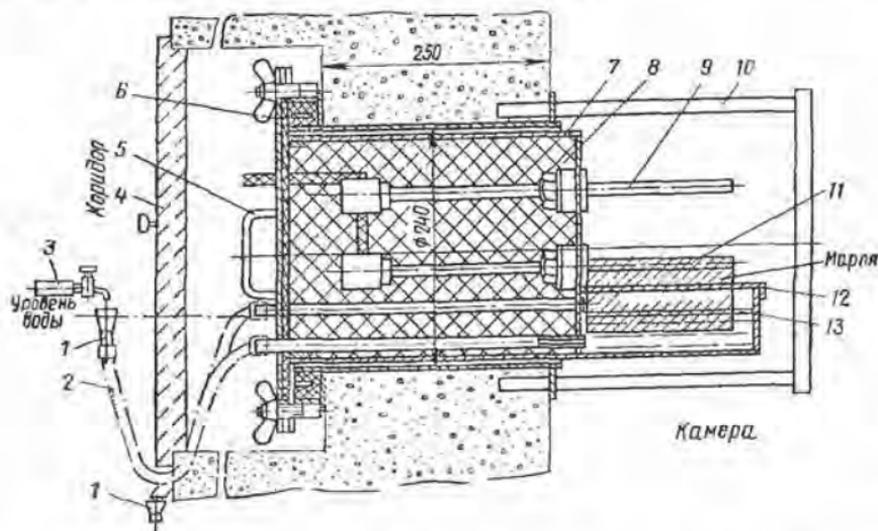


Рис. 122. Установка датчиков и подача воды к дистанционному психрометру:

1 — воронки для избыточной воды; 2 — шланг; 3 — подвод конденсата; 4 — дверка; 5 — ручка стакана; 6 — резиновое уплотнение; 7 — выдвижной стакан; 8 — теплоизоляция; 9 — сухой термометр; 10 — предохранительная рамка; 11 — мокрый термометр; 12 — крышка в ванночке с продольной щелью 10 мм; 13 — ванночка

При низкой температуре и малой скорости воздуха возникает заниженная психрометрическая разность; однако при скорости воздуха выше 1 м/с показания t_m практически точны даже при 0°C и учет поправки не требуется. То же относится к значениям t_m выше 50°C даже в неподвижном воздухе. На складах пиломатериалов состояние воздуха измеряют психрометром Асмана (с вентиляторчиком) или пращевым психрометром (перемещаемым в воздухе).

Степень насыщенности пара φ в воздухе находят по Id -диаграмме методом, показанным на рис. 9, б.

ЦНИИМОД разработал систему дистанционного психрометра из двух термометров сопротивления ТСМ-10 и подвода конденсата к мокрому термометру (рис. 122). Число камер — до десяти. Провода смонтированы по трехпроводной схеме в стальных трубах и через щеточные переключатели подведены к ло-

гометру. Прибор питается током от сетевого источника ИСП-2, прилагаемого к логометру. Класс точности прибора 1,5. Для монтажа этого психрометра есть инструкция с чертежами [46].

Для снижения отвода тепла от термометров переднюю стенку стакана желательно выполнить из нетеплопроводного материала (не металлическую). Следует также предусмотреть возможность сверки показаний прибора с нормальным термометром, выполнив в стакане закрываемое осевое отверстие.

Показания дистанционных термометров любых типов необходимо систематически (ежеквартально) сверять с показаниями нормального контрольного термометра. Оба термометра психрометра во время работы сверяют (в сухом их состоянии). Во время сверки в производственных условиях датчики всех термометров в камере, в том числе и вставляемого контрольного, для повышения их тепловой инерционности временно покрывают теплоизоляцией (ватой, марлей и т. д. на 3—5 мм), а в камере в это время поддерживают постоянный тепловой режим.

64. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ ВОЗДУХА

Для измерения давления воздуха применяют U-образные манометры, микроманометры с наклонной шкалой ТНЖ (тягонапоромер жидкостный) и микроманометры ЦАГИ, а также более точные приборы (точность отсчета 0,02 мм вод. ст.) — миниметры.

U-образный манометр (рис. 123, поз. 7—12) можно изготовить в самом сушильном цехе из двух коротких стеклянных трубок, соединенных резиновой трубкой и прикрепленных к дощечке с миллиметровой шкалой. U-образную трубку получают путем постепенного нагревания на узком пламени и медленного изгибания прямой стеклянной трубки диаметром 7—10 мм, предварительно заполненной мелким сухим песком.

Схема измерений статического $H_{ст}$, динамического H_d и полного H давлений показана на рис. 123, а, где изображен замкнутый воздухопровод с установленными навстречу потоку изогнутыми отбирающими давление трубками, подсоединенными к U-образным манометрам.

Ветвь 3 воздуховода, идущая от вентилятора 1, напорная, а ветвь 13, примыкающая к вентилятору, находится под разрежением. Манометр 9 показывает статическое давление $H_{ст}$, а манометр 10 — разрежение $H_{ст}$; манометрами 8 и 11 измеряют динамическое давление H_d , а манометрами 7 и 12 — полное давление H [см. (200)].

В напорной (верхней на рис. 123, а) ветви воздуховода полное давление равно арифметической сумме динамического и статического давлений, а в ветви разрежения — их алгебраической сумме; в последнем случае знак полного давления H соответствует знаку большего значения H_d или $H_{ст}$ (имеется в ви-

ду, что H_d всегда положительное, а $H_{ст}$ в ветви разрезания отрицательное).

Скорость воздуха в воздуховоде, канале и т. д. определяется по (206). Так, в случае полученной замером $H_d=20$ мм вод. ст., т. е. 196 Па, при $\rho=0,8$ кг/м³ будет

$$V=4,43\sqrt{20/0,8}=22,2 \text{ м.с.}$$

Для отбора давлений часто применяют металлическую пневмометрическую трубку ЦАГИ (рис. 123, б), которую устанавливают изогнутым концом навстречу воздушному потоку. Отвер-

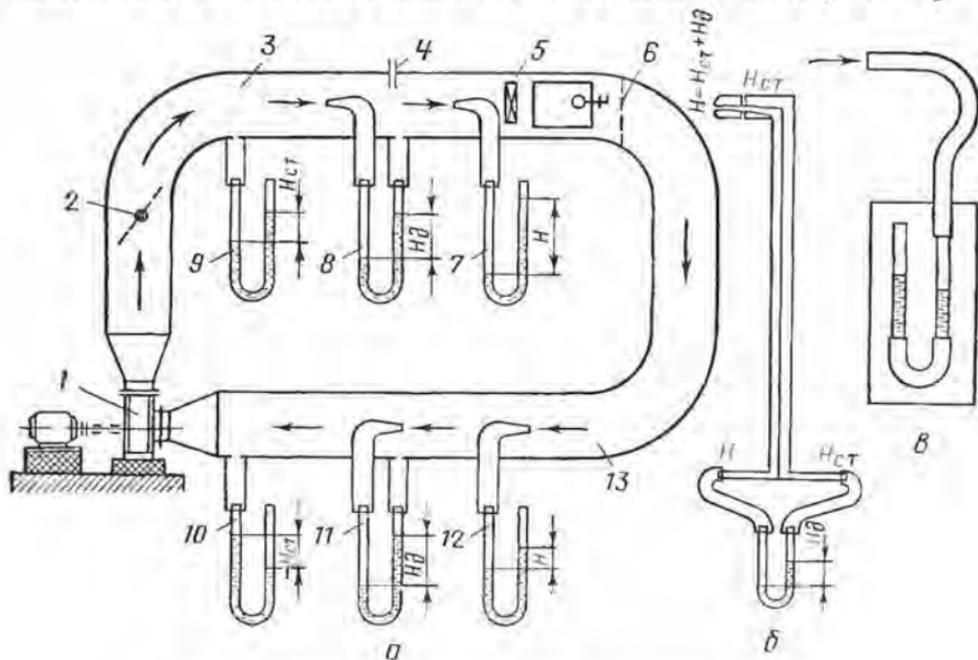


Рис. 123. Схема отбора давлений воздушного потока:

а — воздуховод с U-образными манометрами; б — пневмометрическая трубка, подключенная (внизу) к манометру; 1 — вентилятор; 2 — регулировочная заслонка; 3 — напорный участок воздуховода; 4 — психометр; 5 — изучаемый материал; 6 — электронагреватель; 7—12 — манометры; 13 — участок разрезания; в — U-образный переносной манометр лабораторного изготовления

стие в конце трубки отбирает полное давление, а кольцевая щель — статическое. Эти давления передаются внутри трубки отрезкам, подсоединенным резиновыми трубками к манометру. Если к манометру (показан внизу) подсоединить только левый отрезок, будет замерено полное давление H (аналогично замеру манометром 7 или 12 на схеме рис. 123, а); если подсоединить только правый отрезок, определится $H_{ст}$ (аналогично замеру манометрами 9 и 10); если подключить одновременно оба отрезка, определится H_d (аналогично замеру манометрами 8 и 11).

Прибор для непосредственного измерения скорости воздуха называется **анемометром**. По конструктивному выполнению различают анемометры крыльчатые с плоскими лопатками и чашечные, метеорологические, с полусферическими чашечками (рис. 124, а, б). Диапазон измерения скорости воздуха крыльчатым анемометром АСО-3 0,5—5 м/с, а чашечным 1—30 м/с; при более высоких скоростях прибор может испортиться.

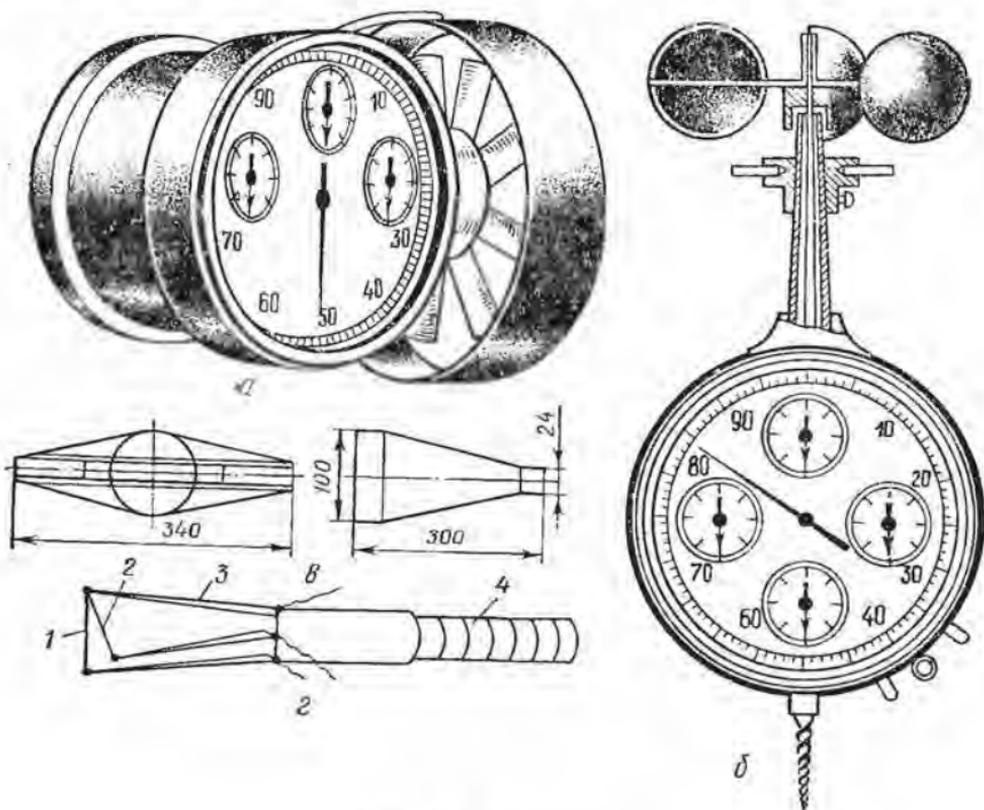


Рис. 124. Анемометры:

а — крыльчатый; б — чашечный; в — диффузор к крыльчатому анемометру для измерения скорости воздуха на выходе из штабеля; г — датчик термоанемометра. 1 и 2 — нити накала; 3 — стержень; 4 — ручка

Для измерения значительных по скорости воздушных потоков удобен чашечный анемометр АРИ, позволяющий мгновенно делать отсчет по положению стрелки на циферблате.

Малые скорости воздуха дистанционно измеряют термоанемометрами с компактными датчиками в виде платиновой нити, нагреваемой электрическим током (рис. 124, г). Сопротивление нити зависит от ее температуры, обусловленной скоростью омывающего ее воздуха. По показанию гальванометра с помощью тарировочной кривой определяют скорость воздуха. Прибор с двумя нитями, расположенными под углом 8—10°, позволяет

измерять не только скорость, но и направление воздушного потока. Экспериментальная база института «Уралпромстройпроект» изготавливает полупроводниковые термоанемометры ЭА-1М и ЭА-2М, для диапазона скоростей воздуха 0—5 м/с.

65. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ

Влажность древесины определяют непосредственным измерением, например при высушивании (весовой метод — наиболее точный), или косвенным определением, исследуя какое-либо свойство древесины, зависящее от влажности.

Весовой метод заключается в следующем. О влажности партии материала судят по влажности характерных его проб (не менее трех). Образцы на влажность длиной 1—1,5 см вдоль волокон отрезают на расстоянии не менее десятикратной толщины от торца доски. Затем их очищают от заусенцев и немедленно взвешивают на технических весах. После взвешивания (масса m_1) образцы высушивают до постоянной их массы m_2 в термостатическом сушильном шкафу при $100+5^\circ\text{C}$. Высушиваемые образцы взвешивают через 6, а затем через каждые 2 ч. Влажность древесины вычисляют с точностью до 1% по формуле (49).

Для более быстрого, но приближенного определения влажности температуру в сушильном шкафу повышают до $130—140^\circ\text{C}$. Для еще большего ускорения сушки образцы после первого взвешивания размельчают. При этом наблюдают за тем, чтобы древесина не потемнела до контрольного взвешивания, иначе будет установлена ошибочная влажность.

К недостаткам этого метода относится его длительность и порча части древесины для вырезки образцов на влажность.

Электрический метод. Наиболее точно поддаются измерению электрические свойства древесины, которые и положены в основу многочисленных конструкций влагомеров. Большинство электрических влагомеров основано на изменении омического сопротивления в зависимости от влажности древесины (см. рис. 49, б).

Влажность измеряют втыканием игл прибора в пластъ доски на глубину 0,2 ее толщины так, чтобы электрический ток проходил вдоль волокон; по величине омического сопротивления древесины на шкале отсчитывают непосредственно значение ее влажности. Точность отсчета влажности в диапазоне 6—30% около 0,1, а в диапазоне 30—100% — около 0,2 от измеряемой величины.

На предприятиях используют электровлагомер ЭВ-2К с двумя диапазонами измерения влажности 7—30 и 30—60%; к прибору прикладывают инструкцию по его пользованию (завод «Камоприбор» — г. Камо АрмССР).

Метод усадки древесины. Между усадкой древесины и понижением ее влажности существует корреляционная зависимость (см. рис. 38), которую пытались [12] использовать для контроля влажности древесины во время сушки. Был предложен метод записи усадки штабеля на диаграмме барабана часового механизма, устанавливаемого в коридоре управления. Прибор связан со штабелем тонкой проволокой и блочками. Продолжаются публикации о попытках применить аналогичные методы. Этим подтверждается жизненность проблемы и необходимость ее дальнейшего изучения на предмет выявления оптимального решения и практического использования в сушильной технике.

Неточность этого метода обусловлена особенностью прокладок с различной влажностной и реологической характеристикой, а также неизученностью закономерностей усадки древесины в различных условиях высушивания.

Не исключено производственное использование этого метода при высушивании материала определенной характеристики, а также при сушке заготовок (без прокладок).

Известны стержневые приборы для замера усадки штабеля пиломатериалов. Их можно использовать в первую очередь для контроля влажности древесины при атмосферной сушке пиломатериалов. На рис. 125, б приведен автоматически записанный график усадки штабеля во времени при камерном процессе сушки сосновых досок сечением 25×100 мм (данные получены автором в камере № 1 ММСК-1). В верхней части рис. 125, а показаны параметры этого сушильного процесса.

66. АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Основные положения

Автоматическое регулирование тепловых процессов применяется во многих отраслях промышленности. В приборостроении разработано большое количество систем автоматических регуляторов, пригодных для регулирования сходных процессов в разных производствах.

Попытки создать и внедрить автоматические регуляторы сушки пиломатериалов пока не увенчались успехом. Не установлена и сама система автоматического регулирования сушильного процесса. Применяют только терморегуляторы, поддерживающие постоянные температуры t и t_m или t и Δt (что точнее) в течение определенного этапа сушки. Затем задатчик переставляют в новое положение и т. д. Известны приборы программного регулирования, воздействующие на температуру сушильного агента. Применительно к сушильным туннелям [49] надежной может оказаться пневматическая система ПУСК-ЗД

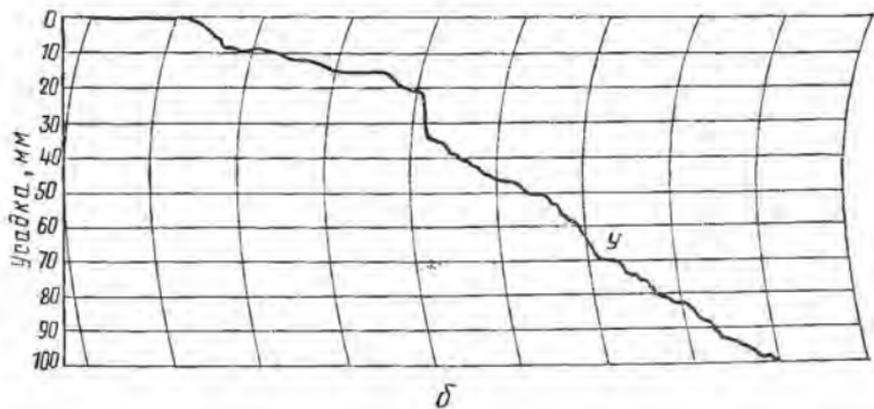
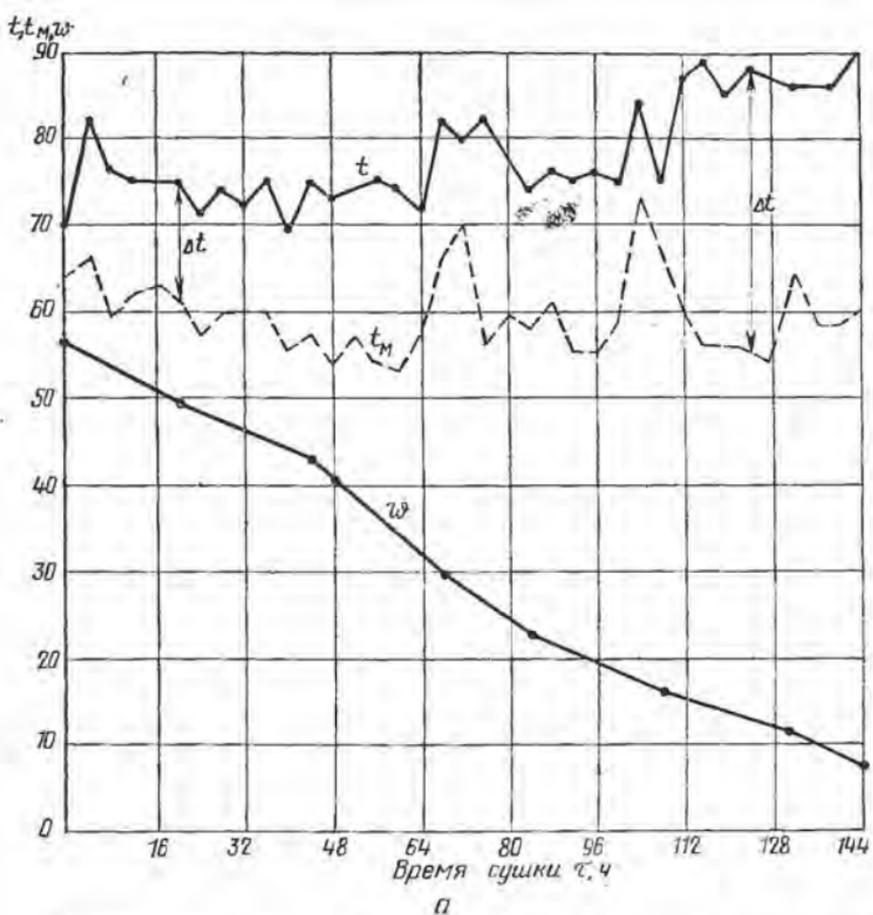


Рис. 125. График процесса сушки с автоматической записью усадки штабеля:
 t и t_M — кривые температур по сухому и мокрому термометрам; ω — кривая сушки; $У$ —
 кривая усадки штабеля

с дилатометрическими (стержневыми) датчиками температуры, изготавливаемая Усть-Каменогорским заводом приборов, а для сушильных камер — прибор «Роса», разработанный Свердловским НИИПревом.

Однако способы регулирования процесса сушки не учитывают напряжения, возникающие в древесине при высушивании, и их закономерности. А именно напряжения вынуждают периодически увлажнять материал или замедлять интенсивность сушки по ходу процесса в зависимости от реологической характеристики и состояния высушиваемого материала. Поэтому было бы правильнее автоматически регулировать процесс сушки пиломатериалов не по времени или по уменьшению влажности материала, а в основном по величине возникающих в нем напряжений (см. рис. 67).

Регулятор должен ограничивать температуру древесины на различных этапах сушки, не допуская ее перегревания и, следовательно, частичной порчи.

Автоматическое регулирование психрометрической разности воздуха в камере пуском в нее увлажнительного пара неприемлемо, так как влечет за собой добавочный расход регулирующего пара и потерю тепла с нагретым воздухом при открытых или полуоткрытых приточно-вытяжных заслонках. Автоматическое регулирование психрометрической разности лучше осуществлять изменением воздухообмена камеры или туннеля, которые должны быть достаточно герметичными. В негерметичных сушильных установках регулирующий механизм может быть временно подключен к паровому вентилю увлажнительной трубы при максимальном (наглухо) закрытии воздухообменных каналов и хорошем уплотнении и утеплении дверей.

Основные принципы действия регуляторов в сушильных установках

Во всяком регуляторе различают датчик, воспринимающий импульс от регулируемой среды, координирующее устройство и исполнительный механизм.

Регуляторы, у которых исполнительный механизм работает только за счет энергии, получаемой от датчика, называются регуляторами *прямого* действия. В регуляторах *непрямого* действия исполнительный механизм работает за счет постороннего источника энергии (электрического, пневматического, гидравлического и других реле).

Примером регулятора прямого действия служит устройство, показанное на рис. 126, а, автоматически поддерживающее на постоянном уровне температуру в сушильном шкафу. Биметаллическая спираль или пластинка 1 при охлаждении изгибается свободным концом кверху и, соприкасаясь с контактным винтом 2, включает ток в электрокалорифер 3, а при повышении

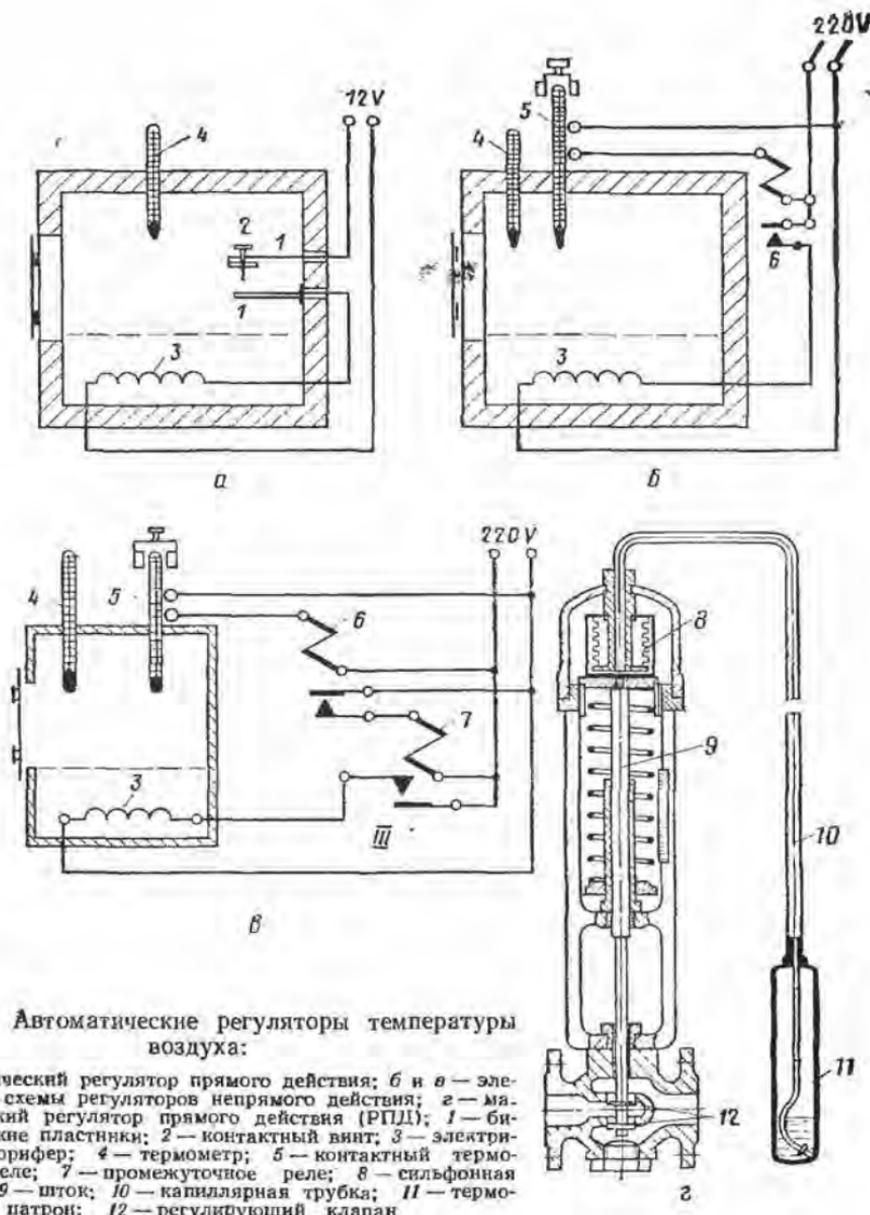


Рис. 126. Автоматические регуляторы температуры воздуха:

а — электрический регулятор прямого действия; *б* и *в* — электрические схемы регуляторов непрямого действия; *г* — манометрический регулятор прямого действия (РПД); *1* — биметаллические пластинки; *2* — контактный вивит; *3* — электрический калорифер; *4* — термометр; *5* — контактный термометр; *6* — реле; *7* — промежуточное реле; *8* — сильфонная мембрана; *9* — шток; *10* — капиллярная трубка; *11* — термометр; *12* — регулирующий клапан

температуры в шкафу изгибается книзу и выключает ток. Желательную в шкафу температуру, измеряемую термометром *4*, устанавливают, поворачивая винт *2*.

Термостатический сушильный шкаф с регулятором непрямого действия показан на рис. 126, *б*. При повышении температуры ртуть в контактном термометре *5* поднимается и воздействует на реле *6*, которое выключает ток, поступающий в элек-

трокалорифер 3. При понижении температуры в шкафу ртуть в контактном термометре опускается и реле включает электрокалорифер. На рис. 126, в дана схема с более мощным электрокалорифером 3, который включается промежуточным реле 7, приводимым в действие посредством реле 6 и контактного термометра 5.

Примером регулятора прямого действия РПД в паровых сушильных установках является прибор, показанный на рис. 126, г. При нагревании термоматрона 11 (с легкокипящей жидкостью), помещенного в характерную зону сушильной камеры, давление пара находящейся в нем жидкости увеличивается и через капилляр 10 передается в сильфонную (гармониковую) мембрану 8. Расширяясь, мембрана передвигает шток 9 регулятора вниз и прикрывает клапан 12 на паропроводе, идущем к калориферу. При охлаждении термоматрона 11 клапан 12 открывается. Точность регулирования этим прибором 2—3° С. Регулятор пригоден для использования в паровых сушильных туннелях.

Примером регулятора непрямого действия в газовых сушильных туннелях служит релейно-шаговый авторегулятор температуры, воздействующий на шибер продуктов сторания [10]. Шибер можно также перемешать вручную при помощи рукоятки.

При таком автоматическом регулировании устраняются резкие колебания температуры сушильного агента, более точно выдерживается заданный режим сушки и облегчается обслуживание сушильной установки непрерывного действия.

Недопустимо автоматизировать разлаженные, неудовлетворительно работающие сушильные установки. Не следует пока работать над автоматизацией небольших паровых камер. Не эффективна автоматизация при недостаточном питании сушильных камер паром, а также нерегулярной, недостаточной подаче в них пиломатериалов и т. п.

Применительно к высушиванию пиломатериалов возникают следующие специфические особенности, обуславливающие временную трудность перевода на такую ступень управления этого участка. Процесс сушки единичного образца пиломатериала сложен и многообразен по составляющим его более простым процессам. Расчленение его по сушильным признакам на составляющие процессы (операции) еще не выполнено с необходимой точностью и четкостью. Высушиваемые пиломатериалы в их массе многообразны по древесным породам, сечению, влажности и требованиям к качеству сушки, вследствие чего возникает потребность в усложненных закономерностях их регулирования.

Характерная особенность сушки пиломатериалов — большая длительность такой их обработки (несколько суток и даже недель). Выделение квалифицированных специалистов по обслу-

живанию приборов в медленно протекающем и недорогом производстве (стоимость сушки 4—6 руб/м³) эффективно только в крупных цехах.

Автоматизации предшествует всестороннее изучение и точное понимание автоматизируемого процесса, расчленение его на элементы (операции). Автоматизация очень эффективна в массовом производстве — изготовлении спичек, карандашей, укладке очень большого количества досок в штабеля и особенно при кратковременных процессах.

67. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СУШИЛЬНЫХ ТУННЕЛЕЙ И КАМЕР

Контроль и регулирование сушильных туннелей

Применительно к туннельному процессу сушки можно наметить ступени усовершенствования техники наблюдения за процессом сушки пиломатериалов и управления процессом в зависимости от мощности сушильного цеха, состояния пиломатериалов и требований к качеству их высушивания, а также ожидаемого последующего развития сушильной и приборостроительной техники.

Первая ступень представляет собой обычные наблюдения, когда осуществляется визуальный контроль температуры t_1 и психрометрической разности Δ_t' воздуха на выгрузочном конце туннеля и периодический анализ электровлагомером влажности древесины, подлежащей выгрузке. Предусматривается дистанционный контроль этих параметров, а также периодический контроль психрометрической разности Δ_t'' (датчик в туннеле находится после первого загруженного штабеля пиломатериалов) с ручной подрегулировкой на основе этой разности количества воздуха, подаваемого к материалу.

Вторая ступень дополнительно предусматривает автоматическую стабилизацию температуры воздуха, поступающего к материалу, а также местный визуальный или дистанционный непрерывный контроль средней влажности подлежащей выгрузке древесины в штабеле. Последний возможен по разности температур входящего в штабель и выходящего из него воздуха, по усадке штабеля и т. д. Для надежного непрерывного контроля влажности подлежащей выгрузке древесины необходимо учесть связанные с таким контролем закономерности сушильного процесса [см. уравнения (160)—(165) и др.].

Третья ступень предусматривает оптимизацию параметров сушильного агента по длине туннеля, а также дистанционную сигнализацию об окончании процесса сушки древесины в последнем штабеле с автоматическим выключением вентиляторов.

На рис. 127 приведены структурные схемы контроля и управления туннельным процессом сушки. На рис. 127, а показана

на схема контроля, когда на загрузочном (слева) и выгрузочном конце (справа на схеме) снимают показания по сухому t и мокрому Δ_t' термометрам и электровлагомером периодически измеряют влажность w древесины. На рис. 127, б показан контроль с дистанционным отсчетом t и Δ_t' , а также дистанционным замером Δ_t'' на загрузочном конце туннеля (обведено квадратами) и ручным отрегулированием количества воздуха L , подаваемого в туннель. На рис. 127, в изображена технически

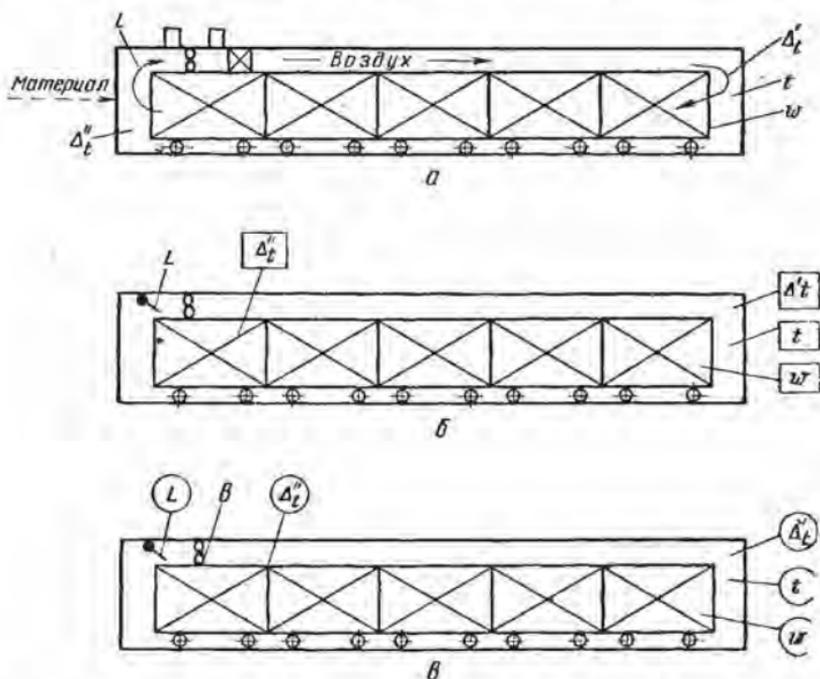


Рис. 127. Структурные схемы развития контроля и управления туннельным процессом сушки пиломатериалов:

а — местный контроль и регулирование; б — дистанционный контроль; в — автоматическое управление

более совершенная схема, включающая также стабилизацию температуры воздуха и дистанционный контроль влажности древесины (обведено кружками), с автоматическим регулированием количества воздуха L , а также остановкой вентилятора б.

Решение проблемы по автоматической сигнализации о достижении заданной конечной влажности, т. е. об окончании сушки — актуально для туннельного процесса сушки древесины всех сортиментов и назначения.

Использовать метод прерывистой циркуляции воздуха по материалу применительно к сушке различных сортиментов древесины в разное время года (см. § 39) могут без существенных

затрат сами предприятия. Предварительное условие — подача в туннель достаточного количества воздуха применительно к зимнему времени при высушивании тонких сортиментов. Расчет относительного времени пауз для высушивания более толстых сортиментов и в другое время года предварительно решается с помощью диаграммы на рис. 87, а. Затем расчет уточняется на практике с учетом местных условий.

Контроль и регулирование сушильных камер

Главное технологическое и технико-экономическое требование к системам контроля, регулирования и автоматизации — дальнейшее повышение качества материала при сушке, являющейся процессом облагораживания древесины. Для эффективного достижения этой цели надо иметь в виду следующее.

Рассматривать раздельно условия, методы и технику камерной сушки опасных по растрескиванию (толстых) и не растрескивающихся при обычном методе высушивания (мягких пород, быстросохнущих тонких) сортиментов. В первом случае учитываются и регулируются внутренние деформации, проявляющиеся при сушке, а во втором предупреждается опасность перегрева материала в зависимости от его влажности (в том числе локальной) и продолжительности избыточного термического воздействия. Для толстых материалов регулирование процесса в первой и второй стадиях сушки должно проводиться по разным программам и с неодинаковой точностью.

Первоочередная задача совершенствования контроля и регулирования процесса камерной сушки пиломатериалов — это автоматическое установление момента окончания сушки древесины и, кроме того, автоматическое окончание ее кондиционирования (для избежания недосушки или пересушки материала и облегчения труда сушильщиков, а также в целях устранения влажностных и упругих деформаций в высушенном материале).

Таким образом, основная трудность в решении проблемы не разработка схем, приборов или их конструирование с соблюдением заданных параметров сушильного агента, а изыскание методов и средств оптимального управления сушильными процессами с учетом свойств древесины как объекта сушки.

Для упорядочения методов и средств контроля и регулирования камерной сушки пиломатериалов надо учитывать следующее: 1) обязательную установку психрометров (например, по схеме на рис. 121, д) из парных термометров как в средних, так и во всех малых по мощности сушильных установках; 2) применение приборов дистанционного контроля температур (см. рис. 122), если количество сушильных камер более пяти, с требуемой точностью их юстировки; 3) использование лабораторных термостатов для периодической сверки парности термометров во всех используемых психрометрах, устанавливаемых

в камерах с продолжительностью сушки материала более 15 сут; 4) применение на первой стадии сушки толстых сортиментов лабораторных термометров с точностью отсчета 0,1—0,2° С в случае высушивания материалов с продолжительностью процесса более 20—30 сут; 5) установку редукционного клапана на магистральном паропроводе сушильного цеха с целью стабилизации давления пара, следовательно, теплоотдачи калорифера; 6) параллельную установку к калориферам камер с продолжительностью процесса более 15 сут двух паровпускных вентилях (обычного и уменьшенного по диаметру) для более точной подачи небольших количеств пара малым вентиляем, а также для подрегулировки им.

В составе лаборатории сушильного отделения должно быть следующее оборудование и приборы: термостатические сушильные шкафы для температур до 105 и до 140° С, лабораторные технические весы на нагрузку 200 г с разновесами, торговые (чашечные) весы на нагрузку 5 и 10 кг с разновесами, электровлагомеры для древесины, приспособления для раскалывания образцов, анемометры крыльчатые (АСО-3) и чашечные (метеорологические), манометры ТНЖ и U-образные, трубки резиновые и стеклянные, часы настенные, лупа, штангенциркуль, логарифмические линейки, счетные приборы, термометры технические со шкалой до 100° С (с запасом не менее 50% от общей потребности), термометры лабораторные.

ГЛАВА II. УКЛАДКА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

68. УКЛАДКА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СУШКИ

В результате неправильной технологии сушки могут возникнуть два существенных вида брака, частично или целиком портящего пиломатериалы, — деформирование и растрескивание (см. параграфы 25 и 40). Напомним, что деформирование высушиваемых пиломатериалов — это результат недостаточного их зажатия, т. е. несоблюдения правил их укладки в штабель, а растрескивание — результат неудовлетворительного процесса сушки.

Наблюдаются многообразные виды деформирования: покорбленность в поперечном направлении, крыловатость, искривление на плоскость, на ребро и др. (см. рис. 41). Это, в свою очередь, может привести к потерям дефицитного и дорогого материала, перегрузке станков, излишнему расходу энергии, затратам по транспортировке излишних отходов и др. Перерасход древесины в различных производственных условиях может ориентировочно достигнуть 10—30% от объема ее сушки.

Деформация пиломатериалов, как правило, протекает внутри камер, за закрытыми их дверями, и крайне медленно, незаметно для текущего наблюдения. ОТК следует тщательно проверять состояние высушенного материала.

Вследствие неудовлетворительной укладки материала могут возникнуть и другие дефекты сушки — неравномерное просыхание материала (если пласти двух, а иногда трех досок смыкаются при их искривлении из-за неправильного размещения прокладок, просыхание такого материала удлиняется), растрескивание материала под влажными широкими прокладками и др.

Таким образом, значимость работ, проводимых на участке погрузки пиломатериалов в сушильные штабеля, выходит за пределы сушильного цеха и даже цеха деревообработки. Результаты работы на этом узловом участке непосредственно влияют на качество выпускаемой предприятием продукции и экономичности его деятельности.

Прокладки и их расположение в штабеле

Для надлежащего зажатия всех досок в штабеле необходимо, чтобы прокладки были одинаковой толщины (тоже относится и к доскам в каждом ряду штабеля) и располагались достаточно близко друг к другу. Применяют деревянные обычно сосновые прокладки из прямослойной древесины, без сучков.

Длина прокладок зависит от ширины штабеля (обычно 1,8 м), их ширина 35—45 мм, толщина $25 \pm \frac{1}{2}$ мм. Прокладки используют только сухие (соответственно конечной влажности высушиваемой древесины, но не выше 12%) после калибровки на рейсмусовом станке при строгании с одной стороны. В каждом сушильном цехе должны быть калибры, которыми периодически (например, раз в месяц или в квартал при длительной сушке материала) проверяют толщину всех прокладок. Выходящие за нормы допусков прокладки отбрасывают. Желательно иметь станок для рассортировки прокладок по толщине.

Прокладки сечением 40×40 мм применяют при высушивании широких досок в камерах с естественной циркуляцией воздуха. Прокладки сечением 19×40 мм за границей используют в камерах со скоростной циркуляцией при укладке узких штабелей. При сушке толстых пиломатериалов в высоких штабелях рекомендуются прокладки шириной 50 мм (для избежания смятия).

Расстояние между прокладками по длине штабеля (шаг прокладок) зависит от древесной породы, толщины и ширины материала, конечной влажности, требуемого качества сушки и длины выпиливаемых сухих деталей. При высушивании хвой-

ных пиломатериалов с конечной влажностью 10—12% шаг прокладок m принимают равным 20-кратной толщине T досок, т. е. $m=20T$.

При сушке дубовых и буковых досок, которые значительно коробятся, $m=15T$; если конечная влажность древесины 5—7%, а сортименты короткие, назначают $m=10T$. В случае высушивания хвойных пиломатериалов до транспортной влажности следует принимать $m=35T$. Зависимость $m(T, \omega_k)$ при сушке досок хвойных пород более точно можно представить соотношением

$$m = 6500T / (35 - \omega_k). \quad (232)$$

Например, при $T=40$ мм, $\omega_k=15\%$ (для досок коэффициент $b=1,0$) получим $m=1000$ мм.

Для пиломатериалов твердых пород $b \approx 0,75$. В случае выпиливания из высушенного материала хвойных пород длинных деталей следует устанавливать $b=0,6 \dots 0,8$. Если после сушки материал разламывается по ширине во время строгания или получается с заметной покоробленностью, это свидетельствует об излишнем шаге прокладок.

По высоте штабеля прокладки располагают вертикально, т. е. одна над другой, в противном случае в результате изгибающих моментов доски получают продольный изгиб. Сбившиеся прокладки выправляют. Нижняя прокладка должна находиться над опорным брусом или над другим прочным основанием. Крайние прокладки у лицевого ровного торца штабеля укладывают заподлицо с торцами досок.

Формирование штабеля пиломатериалов

По форме погруженного штабеля безошибочно можно судить об уровне техники и производства на предприятии этого профиля. Все штабеля должны быть полногрузными по высоте, их выкладывают по метке с тем, чтобы зазор между верхом штабеля и низом перекрытия камеры (или туннеля) был не больше толщины доски с прокладкой. Боковые и торцовые грани штабеля выполняют вертикальными. Однако главное внимание уделяют шагу прокладок, а также вертикальности их рядов — этот признак качества укладки пиломатериалов основной.

В условиях камерной сушки пиломатериалов беспакетные штабеля предпочтительнее пакетных (отпадают операции с пакетами, исключается при этом возможность излома досок, сдвига или даже выпадения прокладок, несовпадения рядов прокладок в разных пакетах, утечки воздуха через зазоры, образованные брусками между пакетами и др.).

Перед началом укладки материала выверяют основание под штабель. Оно должно быть горизонтальным, без местных вы-

пуклостей и понижений. Для проверки используют ровно выпиленную доску, которую прикладывают ребром к основанию штабеля.

Значительная покоробленность досок наблюдается при неудовлетворительной, разнотолщинной их выпилке. Более тонкие доски окажутся незажатыми и, следовательно, при сушке покоробятся. Поэтому более толстые или более тонкие доски отсортировывают и укладывают в штабель отдельными рядами. Желательно калибровать доски перед сушкой, удаляя односторонним строганием избыточную толщину примерно у половины количества досок; таковы требования к распиловке.

При укладке необрезных досок комлями в одну сторону древесина у вершин пересыхает, а у комлей недосыхает; коэффициент заполнения штабеля материалом будет при этом низкий. Необрезные доски через одну рекомендуется укладывать комлями в разные концы штабеля. Желательно, кроме того, смежные доски класть попеременно вверх наружной и внутренней пластью, что способствует повышению емкости штабеля в современных камерах. Если в ряду не помещается целое число досок, посредине ширины штабеля оставляют зазор.

В случае укладки досок разной длины оба торца штабеля выравнивают. По бокам штабеля кладут более длинные доски, а в середине вразбежку по длине короткие, при этом увеличивают количество прокладок. Штабель, выложенный из досок одинаковой длины, имеет два лицевых (ровных) торца и две лицевые грани (с возможностью зазора меньше ширины доски — в середине штабеля); если различие в длине досок небольшое, обязательно выкладывают один лицевой торец. Свисающие концы досок будут испорчены (покороблены).

Для того чтобы боковые стороны штабеля были вертикальными, а полногрузный штабель не зацеплялся за боковые колоды в дверном проеме, рекомендуется на погрузочной площадке сбоку выкладываемых штабелей или пакетов делать ограничительные стенки (рис. 128, а). Правильность положения этих стенок по отношению к рельсовому пути периодически проверяют переносным габаритным (по дверному проему) устанавливаемым на рельсы штабельным шаблоном в виде рамки из тонких реек. Его прикладывают к рельсам у погрузочной стенки, а также к рельсам у дверей камер; просевшие рельсы выправляют.

Для соблюдения правильного положения прокладок и самого штабеля на подмосковном ДОКе № 6 (ст. Железнодорожная) применяют фиксатор прокладок (рис. 128, б). Его основные детали — вертикальные швеллеры № 6, в пазы которых вставляют концы прокладок, накладываемых на штабель. Швеллеры открепляются и могут сдвигаться по стержню 4 вдоль штабеля. По окончании укладки штабеля швеллер 1, с помощью рукоятки 2—2¹ и рычага 3 отводят от штабеля на

несколько сантиметров (поз. 1¹) и штабель перемещают. Фиксатор прокладок устанавливают также сбоку погрузочного лифта (см. рис. 130, б).

Не рекомендуется сдвоенная укладка даже тонких пиломатериалов, так как качество сушки древесины при такой укладке получается низким. Понижается также производительность камер.

Как правило, в камеру можно загружать материал только одного сечения и породы. Разные сортаменты можно высуши-

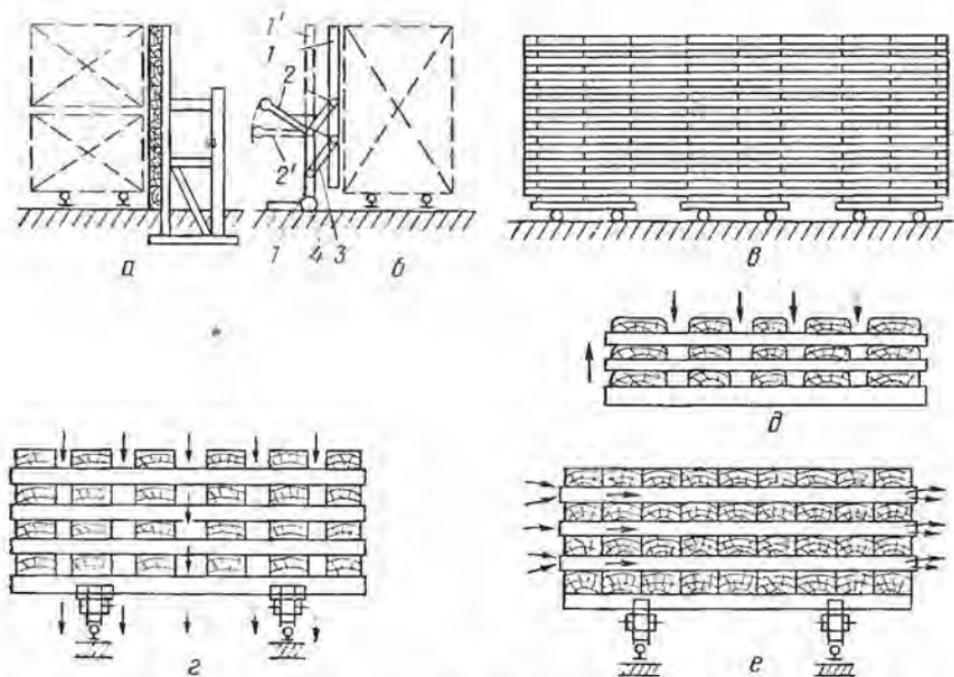


Рис. 128. Способы укладки пиломатериалов в штабель:

а — ограничительная стенка сбоку штабеля; б — фиксатор для прокладок; в — вид штабеля сбоку; г, д — укладка обрезных и необрезных досок со шпациями; е — укладка обрезных досок без шпаций (стрелками показано движение воздуха)

вать вместе только при одинаковой расчетной продолжительности их просыхания. Лишь в камерах с естественной циркуляцией воздуха в верхнюю часть штабеля кладут более толстый материал и по нему ведут режим сушки. При этом достигается основная цель — более равномерное просыхание материала по высоте штабеля.

Известно, что доски радиальной распиловки (сердцевинные из бревна) просыхают медленнее остальных той же толщины; к тому же они менее подвержены растрескиванию, если вырезана сердцевина. Эти доски желательно укладывать в зону штабеля с более интенсивной сушкой или высушивать отдель-

но (при высоких требованиях к равномерности конечной влажности).

В камерах с естественной циркуляцией воздуха и в противочных туннелях (ЦНИИМОД-24-29 при продольной штабелевке) материал укладывают со шпациями. Шпации в середине штабеля в 3 раза шире, чем у боков (рис. 128, *з*). Более узкие доски необрезного материала кладут в середине штабеля (рис. 128, *д*). Ширина всех шпаций в ряду досок должна составлять 30—35% от ширины штабеля. Обязательно соблюдение вертикальности всех шпаций по высоте штабеля. Если это требование не выполняется, замедляется циркуляция воздуха в штабеле, задерживается процесс сушки и ухудшается равномерность просыхания материала.

В камерах со скоростной реверсивной циркуляцией воздуха доски укладывают в штабель без шпаций (рис. 128, *е*). По данным УкрНИИМОД [68], при укладке брусков следует применять небольшие шпации в этих камерах, тогда материал будет просыхать более интенсивно, а также равномернее по сечению, поскольку все грани бруска положительно влияют на внутреннюю теплопроводность и внешнюю его теплоотдачу.

При укладке заготовок нужно руководствоваться в основном тем же, чем и при укладке досок. Короткие заготовки для предохранения торцов от растрескивания следует укладывать впритык, чтобы торцы взаимно закрывались. Над местом стыка на оба торца кладут прокладку. Концевые прокладки штабеля должны быть уложены заподлицо с торцами крайних заготовок или даже выступать за их пределы. Недопустима укладка заготовок в клетку. В качестве прокладок следует применять такие же сухие рейки, как и для досок. При заготовках шириной менее 40 мм соблюдение этого требования обязательно.

69. ПОГРУЗОЧНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА

Погрузочные треки и траверсные тележки

Штабеля пиломатериалов укладывают и перемещают на низких двухколесных тележках — треках (рис. 129, *а*), устанавливаемых парами (рядом на обоих рельсах) или по роликам с неподвижными осями (на месте рельсов) на швеллерах, песущих штабель. Последний способ применяют в коротких сушильных туннелях с поперечной штабелевкой пиломатериалов.

На каждую пару треков в поперечном направлении накладывают съемные подштабельные балочки длиной около 1700 мм, сваренные в виде коробки из швеллеров № 8 и имеющие угловые ограничители для правильной посадки на треки. Применявшиеся деревянные подштабельные брусья — крупногабаритны, кроме того, они ненадежны в эксплуатации и не создают жесткого горизонтального основания, что приводит к коробле-

нию пиломатериалов в нижней части штабеля. Высота трековой тележки с балочками от головки рельсов $150+80=230$ мм. Масса трека около 80 кг, масса стальной балочки около 25 кг, дюралевой (двутавр) — 11 кг. Применявшиеся треки длиной 1800 и 1400 мм неудобны для формирования типовых штабелей

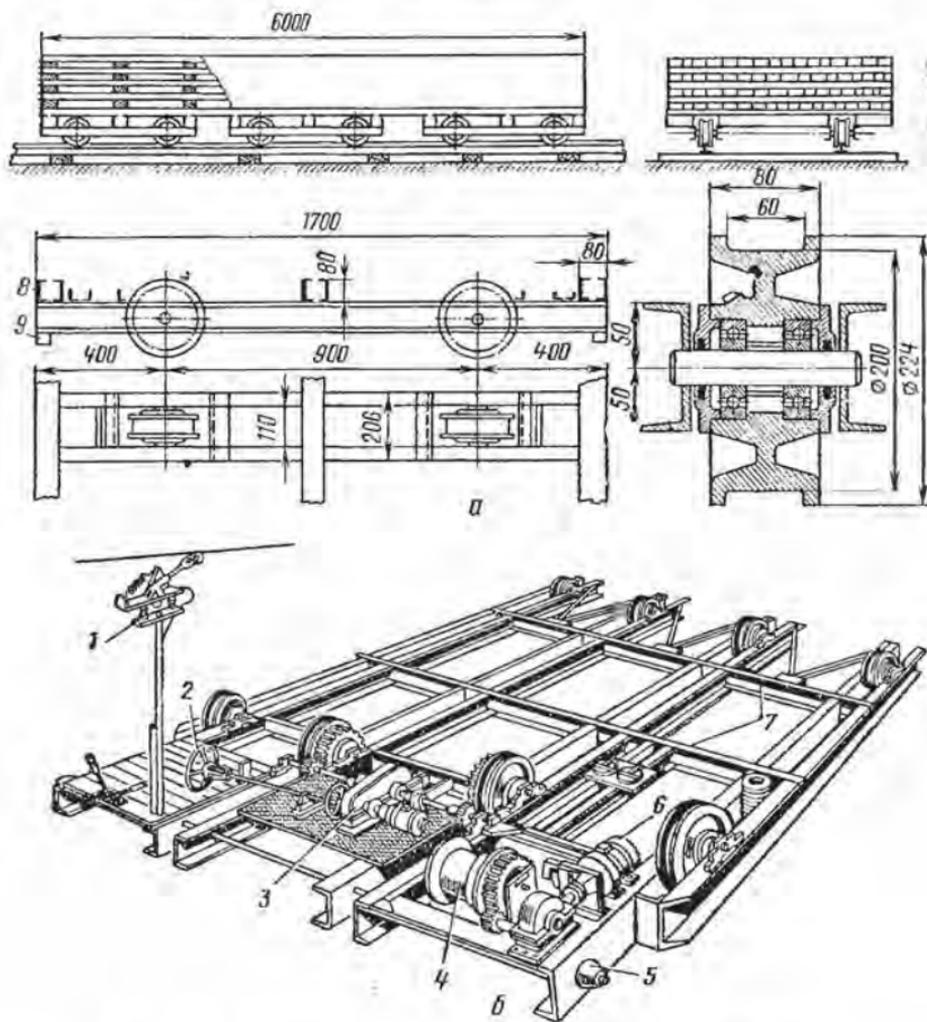


Рис. 129. Оборудование для транспортировки штабелей:

а — укладка штабеля на треки и устройство трека; б — электрифицированная поперечная тележка; 1 — троллей (или петлеобразный кабель); 2 — штурвал ручной доводки тележки; 3 — привод тележки; 4 — барабан для троса передвижения штабеля; 5 — фиксатор; 6 — привод передвижения; 7 — общий рельсовый путь; 8 — съемная балочка; 9 — опора продольных балочек

длиной 6,6 м при укладке тонких пиломатериалов на 9 прокладках. На треке могут быть дополнительные ограничители для балочек (при сушке различных пиломатериалов).

Под штабель длиной 6,6 м всегда устанавливают три пары треков. Их можно объединять продольными навесными балочками в компактную сборную тележку.

Усилие, необходимое для передвижения штабеля на треках с роликовыми подшипниками, в начале движения в среднем 0,04, во время движения 0,03 от массы груза [42].

По отдельным сушильным камерам и складу сухих и сырых пиломатериалов, имеющих общие фронты передвижения, штабеля развозят траверсной тележкой, перемещаемой в траверсной выемке (рис. 129, б).

Разность уровней рельсовых путей в сушильных камерах и в траверсной выемке, т. е. высота траверсных тележек ЭТ-2,5 (Гипродревпром) для заготовок длиной до 2500 мм, а также ЭТ-6,5 (Гипродревпром) и ЭТ-20 (Гипродрев) для досок длиной 6,5 м 215 мм; высота тележки должна быть минимальная. Тележки эти приводные; ток снимается от электросети тролле-ем (см. рис. 129, б) или подвешенным к тросу на кольцах кабелем, который собирается петлями или распрямляется при движении тележки вдоль траверсной выемки. Грузоподъемность тележек ЭТ-2,5, ЭТ-6,5 и ЭТ-20 соответственно 5, 15 и 20 т.

Погрузочные приспособления и машины

Погрузочная площадка сушильного цеха связана внутризаводским транспортом со складом пиломатериалов, с сортировочной площадкой лесопильного цеха и потребителями древесины.

При ручной укладке пиломатериалов с погрузочной площадки в штабель нормальной высоты (0,3+2,6 м) наиболее трудоемко формирование верхней половины штабеля. Стоимость ручной укладки пиломатериалов в верхнюю половину штабеля примерно в 2 раза дороже, чем в нижнюю.

Для облегчения погрузочных работ рекомендуется следующее. Грузят штабеля с двух уровней: нижнюю половину укладывают с уровня пола площадки, а верхнюю с эстакады (рис. 130, а). Для поднятия тяжелых досок применяют два вертикальных, а также два наклонных конвейера, верхние концы которых приподнимаются по мере укладки штабеля. На рис. 130, в, 4, а также на рис. 128, а, слева, показана ограничительная стенка для штабеля. Если запасные пакеты досок находятся далеко от формируемого штабеля, для перемещения их над погрузочной площадкой (в поперечном к ней направлении) целесообразно установить монорельс, по которому они тельфером подаются с любого места погрузочной площадки к штабелю, в том числе на эстакаду (рис. 130, а). Грузоподъемность тельферов 2—3—5 т.

В средних по мощности сушильных цехах применяют штабельные лифты, опускающие штабель ниже уровня пола погру-

зочной площадки по мере увеличения его высоты, чтобы уровень укладки досок был постоянным (0,6—0,8 м), что резко повышает производительность труда (рис. 130, б). Сбоку штабеля следует установить фиксатор прокладок (слева на рис. 130, б и 128, б).

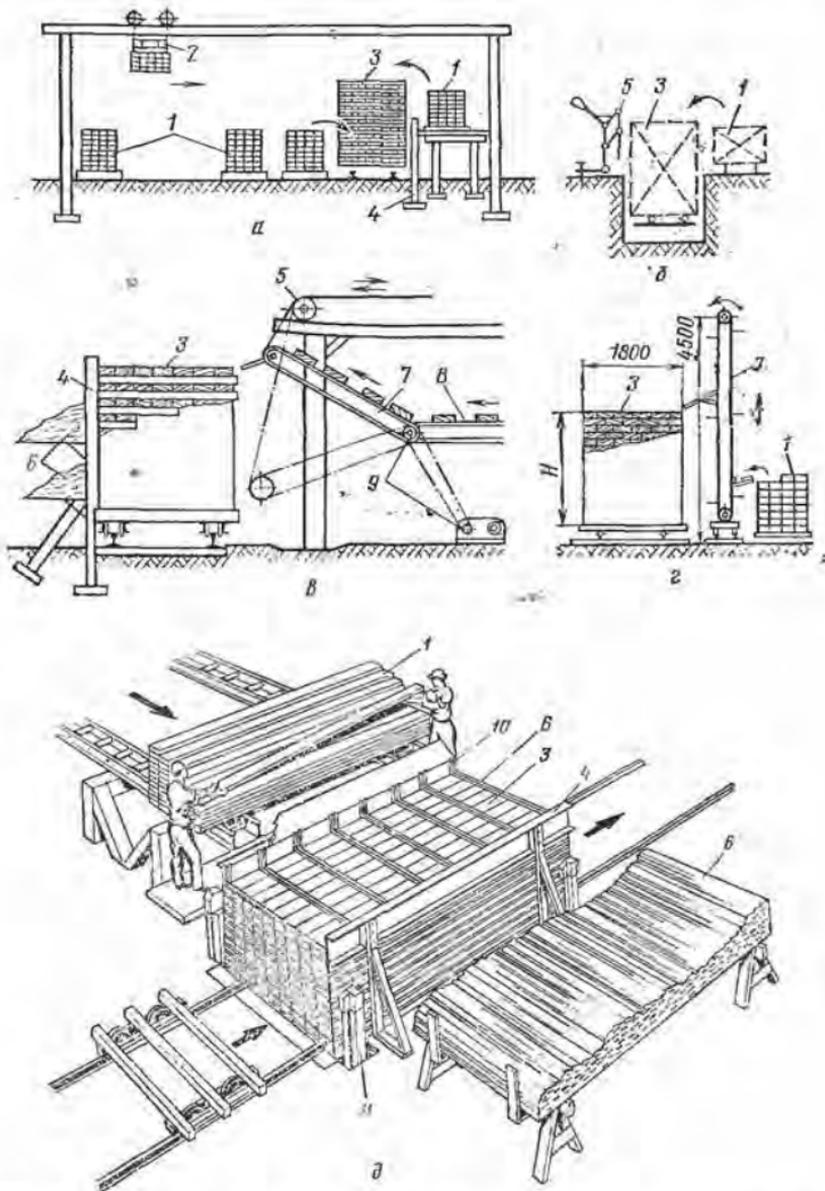


Рис. 130. Устройства и механизмы для формирования сушильных штабелей: а — двухвысотная погрузочная площадка и электроталь; б — штабельный лифт; в — двухцельный конвейер с концевым подъемником; г — штабелер; д — погрузочная площадка с лифтом; 1 — транспортные пакеты; 2 — электроталь; 3 — погружаемый штабель; 4 — ограждающая стенка; 5 — механизм подъема; 6 — прокладки; 7 — подъемный конвейер; 8 — питательный конвейер; 9 — привод конвейеров; 10 — фиксатор прокладок; 11 — стойка с винтом лифта

Штабельные лифты Л-6,5-15 (Гипродревпром) и ПВ-20 (Гипродрев) имеют грузоподъемность соответственно 15 и 20 т. Пакеты подают к погружаемому штабелю электроталью или вилочным автопогрузчиком.

На рис. 130, в показано применение двухцепного конвейера с концевым подъемником, на рис. 130, г — штабелера для укладки верхней половины штабеля, а на рис. 130, д изображена работа по укладке штабеля с применением лифта.

Можно также формировать полуштабеля на уровне пола погрузочной площадки, подвозить их по рельсам к траверсной тележке, накатывать на нее полуштабель, поднимать его ле-

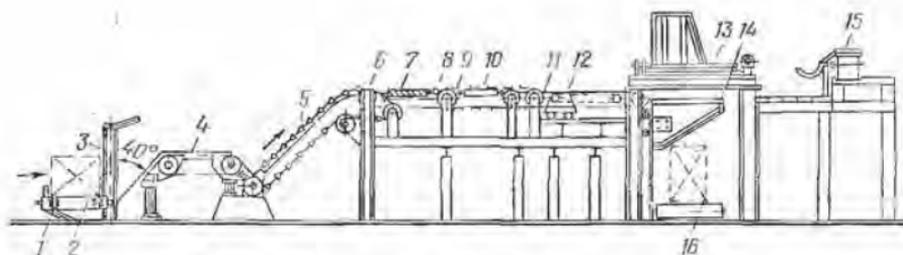


Рис. 131. Штабелеформирующая машина:

1 — цепной приемный конвейер; 2 — роликовый конвейер; 3 — наклонный подъемник для разборки досок; 4 — приемный конвейер; 5 — наклонный конвейер; 6 — передаточный конвейер; 7 — винтовой роликовый конвейер-торцеварователь; 8 — отсекатель поштучной выдачи досок; 9 — конвейер с разновысокой цепью; 10 — роликовый конвейер-торцеварователь; 11 — конвейер набора щита плотного и со шпациями; 12 — каретка укладки щита; 13 — кассетное устройство для прокладок; 14 — подъемник; 15 — ленточный конвейер для подачи прокладок; 16 — штабель пиломатериалов

бедкой траверсной тележки ЭТ-20-П (Гипродрев), накатывать на тележку второй полуштабель и таким путем из двух полуштабелей формировать полный штабель. То же можно выполнять автопогрузчиком, а также посредством электротали, по схеме на рис. 130, а [42].

Существенный недостаток формирования сушильного штабеля из двух полуштабелей — неточная погрузка верхнего полуштабеля на нижний и несовпадение рядов прокладок. Для частичного избежания этого необходимо применять ограничительные стенки. Происходит также некоторое смятие кромок и даже поломка тонких досок при подъеме полуштабеля.

В крупных сушильных цехах целесообразно применять штабелеформирующие машины ПФМ (рис. 131), механически укладывающие пиломатериалы в полуштабели высотой 1,3 м (ПФМ-10), а также мостовые краны для перемещения пакетов и полуштабелей. К недостаткам такой технологии относятся излишние операции с формированием полуштабелей в штабеля; при этом также не соблюдается точность взаимной укладки полуштабелей и механически портится часть досок. Необходимо формировать непрерывно полный штабель.

Механическая разборка штабелей пиломатериалов производится штабелеразгрузчиком. Существует несколько конструкций таких устройств [51].

Примерная норма ручной укладки пиломатериалов средней толщины на человека 15 м³/смена, при наличии лифта — 25, на ПФМ — 45 м³/смена; норма разгрузки штабелей пиломатериалов без лифта на человека 30, а с лифтом 50 м³/смена, т.е. в 2 раза больше, чем при ручной укладке.

Схемы механизации передвижения штабелей пиломатериалов

В очень малых сушильных цехах с одной-тремя низкими одноштабельными камерами траверсные пути можно не устраивать. Достаточно продлить рельсовый путь перед камерами на длину двух штабелей и иметь на них в запасе погруженные штабеля сырых пиломатериалов. Выгружаемые из камеры сухие пиломатериалы быстро разбирают и затем немедленно загружают сырые. Штабеля перемещаются при помощи лебедки с блоками.

В небольших сушильных цехах устраивают траверсный путь (рис. 132, а) шириной 6,5 м. Траверсная тележка и штабеля пиломатериалов могут перемещаться приводной, а также стационарной лебедкой с применением блоков. В самой камере блоки устанавливаются недалеко (около 1,5 м) от дверей для вталкивания штабелей.

В средних по мощности цехах со значительным количеством сушильных камер следует применять только приводные траверсные тележки (рис. 132, б), которые обслуживают также склады сырых и сухих пиломатериалов, примыкающие к общему траверсному пути.

В крупных сушильных цехах, состоящих из сушильных туннелей (рис. 132, в), применяют приводные траверсные тележки (на загрузочной стороне можно с порталом ЭТ-20-П для поднятия полуштабелей). Внутри туннеля недалеко от дверей устанавливают блок, с помощью которого тросом вталкивается штабель сырых пиломатериалов, продвигающий вперед на 6,6 м все штабеля, находящиеся в туннеле. На выгрузочной стороне туннелей есть второй траверсный путь для соответствующего перемещения высушенной древесины. Аналогичным методом перемещают штабеля в паровых и газовых туннелях с зигзагообразной циркуляцией воздуха (рис. 132, г).

Метод перемещения штабелей в туннелях с поперечной загрузкой материала (рис. 132, д) своеобразен по технике выполнения; в основном он был рассмотрен ранее (см. § 54, рис. 104).

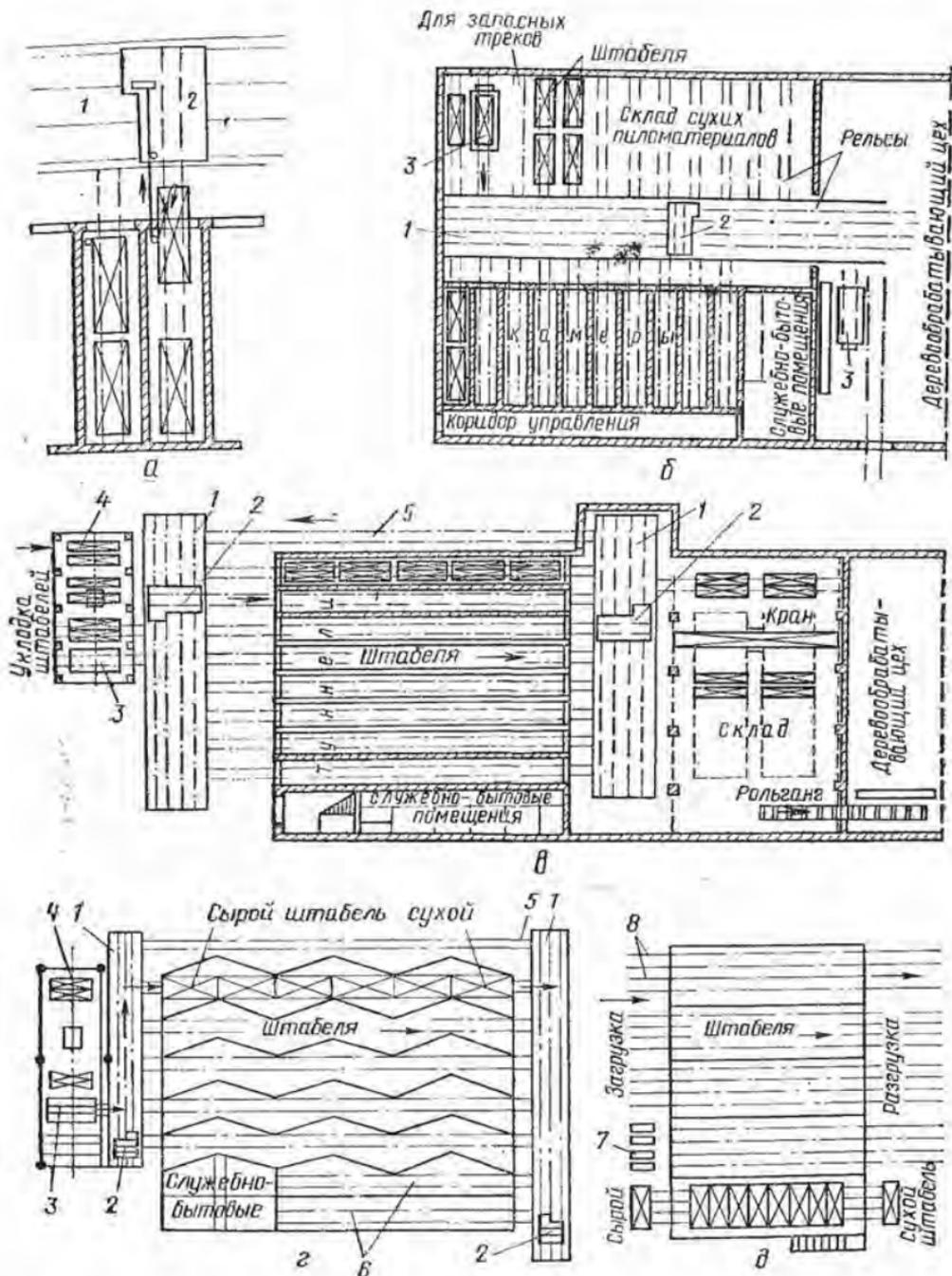


Рис. 132. Схемы передвижения штабелей при различных планировках сушильного цеха:

а — небольшой цех; б — цех из значительного количества камер; в — цех из туннелей с продольной загрузкой; г — цех из газовых (и паровых) туннелей; д — из туннелей с поперечной загрузкой; 1 — траверсный путь; 2 — механическая траверсная тележка; 3 — погрузочный лифт; 4 — электроталь; 5 — путь для возврата трекон и прокладок; б — камеры кондиционирования; 7 — швеллеры; 8 — ряды роликов

Прижатие верха штабеля

После погрузки штабеля до начала сушки необходимо прижать верхние ряды материала для предупреждения его коробления.

Сила прижатия должна соответствовать массе 5—10 рядов погруженного материала (больше — при низкой конечной влажности), что соответствует 1—2,5 т на нормальный штабель (больше также для толстых пиломатериалов твердых пород). Это соответствует удельному давлению от $9,8 \cdot 1000 / (6,6 \cdot 1,8) = 833$ Па до $9,8 \cdot 2500 / (6,6 \cdot 1,8) = 2058$ Па (85—210 кгс/м²) или ориентировочно 1000—2000 Па.

Наиболее актуально применение прижимов на низких штабелях и меньше — при высоких штабелях с значительной конечной влажностью древесины.

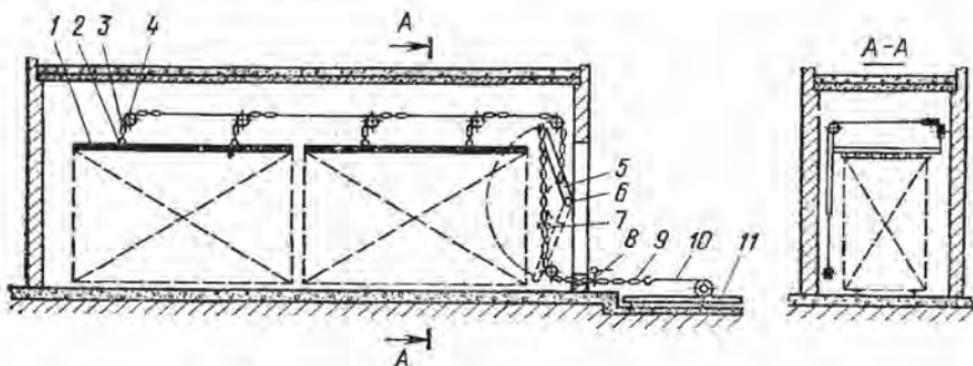


Рис. 133. Прижимный механизм штабеля:

1 — продольная прижимная пластина; 2 — поперечная подвесная балка; 3 — подвеска; 4 — блок; 5 — рычаг; 6 — опора рычага; 7 — стопорная шайба на цепи; 8 — стопорная заслонка с прорезью для цепи; 9 — цепь, подсоединяемая к тросу; 10 — трос дебедки траверсной тележки; 11 — траверсная тележка

Для прижатия штабеля рекомендуется положить на его верх 2—3 ряда толстых бракованных досок, предназначенных для этого, или уложить по прокладкам одну-три съемных плиты (желательно составные, ограниченно гибкие). Укладывать и снимать плиты удобно проводить на конце траверсного пути, с помощью тельфера. Ширина плит около 1600 мм, габаритная толщина — до 80 мм; поднимаются они цепями, прикрепленными по диагоналям в точках на расстоянии 0,2 их длины от угла плиты.

Можно по методу ЛТА—ЦНИИМОД зажимать штабеля пневмоцилиндрами, прикрепленными снизу к перекрытию камеры [45]. При вкатке штабеля в камеру штоки механизма под давлением воздуха в верхней части цилиндров опускаются вниз и оказывают давление на штабель материала.

На рис. 133 показан разработанный ВНИИДМАШем механизм для зажатия штабелей гибкими плитами, поднимаемыми

и опускаемыми с помощью тросов, блоков и рычажного редуктора с приводом от лебедки траверсной тележки. Эта система успешно эксплуатируется ряд лет на ММСК-1. Она не нуждается в дополнительном источнике энергии, пользовании чердачным помещением, устройстве отверстий в перекрытии камеры и тщательности обслуживания. Система прижима оказалась в эксплуатации (на эжекционных камерах) вполне надежной и эффективной.

Проекты новых, а также модернизация действующих камер и туннелей должны содержать раздел о прижатии штабелей, если материал высушивается до влажности ниже 18—15%.

70. ПОДГОТОВКА ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛА К СУШКЕ

Основные неполадки оборудования

Сушильное оборудование работает в тяжелых условиях нагретой влажной среды с переменными параметрами; оно может быстро выходить из строя и даже портиться. Необходимо поддерживать его в исправном состоянии.

Перед каждым пуском в работу сушильной камеры осматривают подвижной состав, рельсовые пути, транспортные средства, проверяют плотность закрывания дверей и, если необходимо, ремонтируют их. Камеру очищают от отходов древесины и мусора, проверяют герметичность закрывания шиберов, плотность соединений калориферов, исправность конденсатоотводчиков и др. В сушильных туннелях осмотры такого рода и проверку оборудования проводят не реже 2 раз в месяц.

Один раз в полгода (весной и осенью) обследуют все оборудование и цеховой транспорт. При этом проверяют вентиляторные узлы, воздухопроводы, ширину и прямолинейность рельсовой (или роликовой) колеи и правильность сопряжения рельсовых путей с дверными проемами и с траверсной тележкой. В это же время обследуют и строительную часть сушильной установки: внутреннюю штукатурку камер и туннелей, состояние перекрытий, их утепление, состояние дверей и т. д. и при необходимости капитально ремонтируют. В эжекционных камерах выверяют горизонтальность осей сопел и очищают их изнутри от ржавчины, улучшают герметичность перекрытия реверсивной заслонкой каждого из обоих каналов, экранируют штабеля.

В газовых установках осматривают и при необходимости капитально ремонтируют топку, газоходы, шиберы (проверяют герметичность их закрывания), заменяют двери на более герметичные.

В паровых камерах, оборудованных ребристыми трубами, теплоотдача калорифера обычно резко снижается при нарушении непрерывного уклона труб, в том числе и отходящих от

калорифера. При этом в самом низком месте образуется застой конденсата, который охлаждается и выводит часть калорифера из действия. Признак заполнения части калорифера конденсатом — возникновение в нем гидравлических ударов даже при рекомендуемом медленном пуске в него пара и, тем более, во время работы камеры. Бездействие отдельных частей включенного калорифера устанавливают по отсутствию вскипания на них струйки или капель воды при обрызгивании.

Характерный недостаток на многих предприятиях — плохая работа конденсатоотводчиков. Если конденсатоотводчик не держивает пар, его давление в калорифере падает, следовательно, температура калорифера и отсюда его тепломощность снижаются. Действие конденсатоотводчиков ежедневно проверяют с помощью контрольной трубки (см. рис. 113, а). Теплоотдача калорифера снижается также, если он засоряется мусором, пылью или покрывается слоем ржавчины.

Неисправность паровпускного вентиля определяют прогреванием за ним трубы на значительной длине (более 1 м) при закрытом его состоянии. Если неисправен обратный клапан водоотводчика (в случае прекращения подачи пара и образования в охлаждающемся калорифере вакуума), его трубы заполняются из конденсатной магистрали водой или воздухом, что недопустимо.

Работа вентилятора и воздухопроводов резко ухудшается при засорении, в частности из-за налипания пыли, которая наслаивается даже на лопатках вентилятора, особенно в газовых сушильных установках. Подача воздуха вентилятором резко понижается, если зазор между колесом и обечайкой больше допустимого (см. § 61), а также при уменьшении частоты вращения вентилятора.

Низкие скорости и неравномерное распределение воздуха по материалу предопределяются многими причинами. К основным из них относятся неисправность вентиляторного оборудования (малые вентиляторы и частота их вращения, неправильное действие эжекционной системы и т. д.), неправильная штабелевка материала (неполные по высоте, а также по длине штабеля, когда один из торцов «хвостатый», невертикальный), плохая экранизация штабеля (при этом большие объемы воздуха протекают мимо штабеля и др.). Все это приводит к ухудшению равномерности просыхания материала и снижению производительности сушильной установки.

Контрольные отрезки материала

Для наблюдения за скоростью просыхания материала значительных сечений или ответственного назначения в штабель закладывают контрольные отрезки длиной около 1 м, которые во время сушки периодически взвешивают.

Контрольный отрезок отбирают из доски, вырезанной вблизи сердцевины бревна, без сучков и готовят по схеме, показанной на рис. 134, а. Его среднюю начальную влажность определяют по двум образцам, которые отпиливают с концов отрезка, удалив предварительно торцовую часть, равную примерно 10-кратной толщине материала.

Зная начальную влажность w_n , вычисляют массу абсолютно сухой древесины m_c в контрольном отрезке, начальную массу которого m_n складывают из массы абсолютно сухой древесины m_c и массы влаги $m_c w_n / 100$. Поэтому

$$m_n = m_c + m_c (w_n / 100) = m_c (100 + w_n) / 100. \quad (233)$$

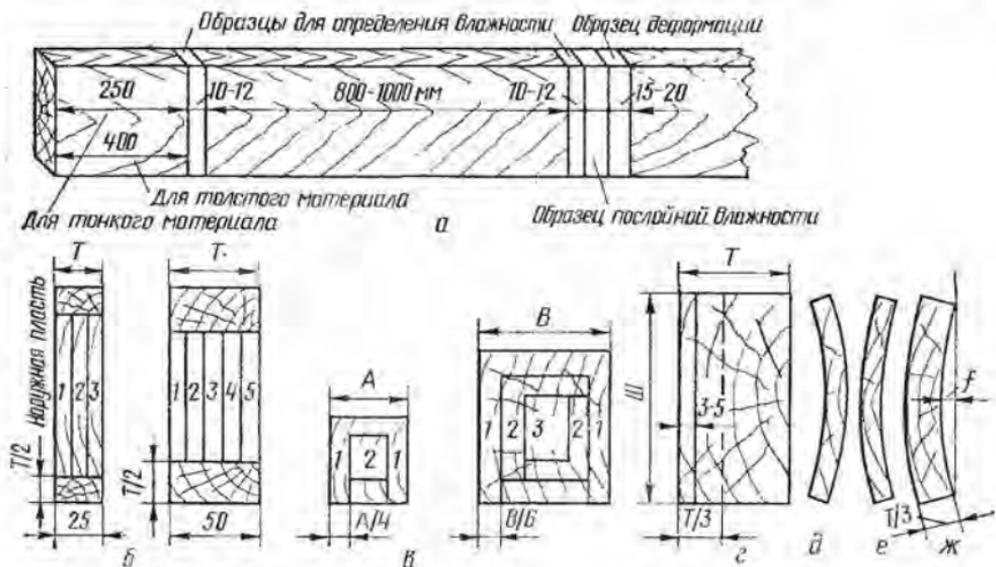


Рис. 134. Схема вырезки контрольного отрезка и образцов:

а — вырезка контрольного отрезка; б — вырезка образцов послойной влажности из доски толщиной до 40 мм (3 слоя) и больше 40 мм (5 слоев); в — то же из брусков толщиной до 60 мм и более 60 мм; г — откалывание слоев внутренних деформаций; д — деформация слоя в первой стадии сушки; е и ж — то же во второй стадии сушки

Отсюда

$$m_c = 100m_n / (100 + w_n). \quad (234)$$

По неизменной массе абсолютно сухой древесины m_c и переменной текущей его массе m находят влажность w для любого момента сушки:

$$w = 100 \frac{m - m_c}{m_c}. \quad (235)$$

Если материал был подсушенным, по образцу послойной влажности определяют распределение влаги по толщине материала. Образец послойной влажности вырезают рядом с образ-

цом для определения средней по сечению влажности материала (рис. 134, а).

Образец послойной влажности раскалывают, как показано на рис. 134, б, отбрасывая более сухую древесину у кромок, и определяют влажность каждой полоски. Затем строят кривую влажности по толщине материала.

Из подсушенных пиломатериалов твердых пород, а также толстых сортиментов мягких вырезают образец внутренних деформаций (рис. 134, в).

Торцы контрольных отрезков, особенно толстых, изолируют паронепроницаемым покрытием — тугоплавким пеком, смоляно-известковой замазкой и др. Однако надежнее закрывать их тонкой жстью с дополнительной теплоизоляцией.

Контрольные отрезки закладывают в характерные места штабеля и ежедневно взвешивают. Одновременно рядом с контрольным отрезком в месте, где материал быстрее всего просыхает, в штабель желательно заложить без взвешивания легко вытаскиваемый более длинный выпиленный из той же доски второй отрезок, из которого периодически вырезают во время сушки образцы внутренних деформаций и послойной влажности. Торцы его следует после каждого отпиливания древесины изолировать, чтобы предотвратить испарение ими влаги. В процессе сушки образцы от второго отрезка также периодически отделяют на некотором расстоянии от торца. Если торцы не изолируют от потерь влаги, к ним возможно плотнее прикладывают куски сырого дерева. Такими кусками желательно закрывать и паронезированные торцы отрезков, чтобы они не нагревались воздухом (поскольку эти торцы не испаряют влагу).

71. НАГРЕВАНИЕ МАТЕРИАЛА ПЕРЕД СУШКОЙ

Наблюдение за прогревом толстого материала

Материал не должен изменять влажность в период начального прогрева. Испарение влаги из материала должно начаться только после полного его прогрева по всей толщине, поэтому внутри сушильной камеры в период прогрева должны быть созданы условия, при которых влага не могла бы испаряться из материала и не конденсировалась на нем в значительном количестве.

Для того чтобы влага не конденсировалась на холодном оборудовании и ограждениях камеры, она должна быть предварительно (без материала) прогрета сухим воздухом.

Режим и продолжительность нагревания материала разных сортиментов в различное время года устанавливают, наблюдая во время прогрева как за состоянием воздуха, так и за материалом, взвешивая периодически, через 1—3 ч, контрольные

отрезки. К началу сушки они могут увеличить влажность на 1—2%.

Температуру воздуха в камере поднимают как можно быстрее пуском пара в калорифер, а через некоторое время в возрастающей мере — и увлажнительного пара. Во время прогрева в камере нужно поддерживать постоянную температуру, примерно на 5° С выше температуры первой ступени режима сушки. Психрометрическую разность регулируют в соответствии с изменением массы контрольных отрезков. Если контрольные отрезки повышаются в массе, т. е. увлажняются, психрометрическую разность увеличивают и наоборот. Холодный материал (зимой) прогревают более сухим воздухом. Это значит, что в начале прогрева психрометрическая разность может быть значительной, затем ее постепенно уменьшают до 3—2° С, если влажность материала более 25%, а полусухого материала — до некоторой постоянной величины, определяемой равновесной влажностью (см. рис. 32).

Если в камеру контрольные отрезки не закладывают, но режим прогрева необходимо установить, во время прогрева периодически взвешивают два-три отрезка из высушиваемого материала. Взвешивание следует делать возможно быстрее, установив весы у самой камеры, если лаборатория находится на значительном расстоянии. По возможности образец лучше взвешивать в самой камере (дистанционно, на весах или подвешенным через перекрытие и т. д.).

Для тонкого материала мягких пород, не требующих качественной сушки, указанные условия прогрева можно не соблюдать.

Продолжительность прогрева

В условиях увлажнения материала продолжительность прогрева сократится за счет выделения теплоты при конденсации на нем влаги. В связи с этим необходимо отметить следующее: при некоторых условиях *температура материала может превысить постоянную в период прогрева температуру воздуха*. Это наблюдается в конце нагревания сухого (на поверхности) материала воздухом с уменьшающейся психрометрической разностью, когда влага начинает *поглощаться уже нагретым материалом* с дополнительным выделением также скрытой теплоты адсорбции. Наоборот, в случае *испарения* влаги из прогреваемого материала длительность прогрева увеличится.

Время окончания прогрева лучше всего проверять термометром или термопарой, чувствительная часть которых заделана через кромку в центр прогреваемого контрольного отрезка, на середине его длины.

Длительность прогрева рассчитывают по (134)—(142). Ориентировочно для соснового материала толщиной 35—50 мм

длительность прогрева 1—1,5 ч летом и 1,5—2 ч зимой на каждый сантиметр толщины материала. Для пиломатериалов мягких пород продолжительность прогрева равна примерно 6% от продолжительности сушки, а для дубовых 1,5—2%. Начало прогрева считается с момента, когда температура в камере достигнет требуемой температуры древесины в конце прогрева.

Переход на режим сушки после прогрева материала осуществляется постепенно. Не рекомендуется принимать срочных мер к удалению избытка влаги из камеры, если психрометрическая разность постепенно увеличивается и без приоткрывания воздухообменных заслонок.

Надо помнить, что при понижении температуры влажный материал будет интенсивно отдавать влагу в воздух, даже полностью насыщенный водяным паром, и что из-за возникновения влажностных (от усушки) деформаций в этих условиях возможно образование трещин.

По окончании нагревания немедленно наступает этап сушки, опасный из-за образования в материале трещин. Эта опасность нарастает в случае даже частичного в это время охлаждения материала. При значительном колебании температуры древесины поверхностные трещины возникают именно в фазе охлаждения влажного материала в связи с интенсивной его влагоотдачей в этот период (поскольку $p_d > p_n$).

Нагревать материал можно с любой быстротой; температурные напряжения в древесине в отличие от влажностных ничтожны.

72. ПРОВЕДЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ

Наблюдение за процессом сушки

Температура воздуха в камере поддерживается с точностью $\pm 2^\circ \text{C}$, а при сушке материала менее ответственного назначения (III категории) с точностью $\pm 3^\circ \text{C}$ от заданной. Отклонение психрометрической разности от заданной допускается соответственно в пределах $\pm 0,1$ и $\pm 0,2$ ее величины.

Точность [49], даваемая в абсолютных значениях температур ($\pm 1,0^\circ \text{C}$), не соответствует требованиям практики — она недостаточна в первой стадии сушки толстых сортиментов, когда $\tau > 10$ сут (возможен брак из-за растрескивания), но излишняя во второй стадии камерной сушки обычных хвойных пиломатериалов или в туннельном процессе (здесь находится не значение температуры, а небольшой диапазон Δ_t разности двух температур, отклонение же $\pm 1^\circ \text{C}$ характеризует точность измерения всего диапазона по шкале прибора).

Кроме температуры и психрометрической разности наблюдают также за состоянием материала и в первую очередь обращают внимание на появление торцовых трещин на свежих тор-

цовых срезах. Возникшие трещинки обводят цветными карандашами и наблюдают за их развитием в начале процесса сушки. Могут появиться пластевые трещины; однако они плохо заметны в досках, уложенных в штабель. Лучше видны торцовые трещины, переходящие в пластевые.

Заданные и фактически отсчитанные температуры записывают в отдельную для каждой сушильной камеры (или туннеля) карту сушки. В карту сушки заносят также данные о начальной влажности материала, просыхании контрольных отрезков и выявлении внутренних деформаций, создающих опасность растрескивания материала.

Последние закономерности наиболее просто и методически обоснованно контролировать предлагаемым способом измерения стрелы прогиба отделенного от образца наружного слоя увеличивающейся толщины. Слой периодически, по мере просыхания материалов, отделяют, откалывая прямым лезвием ножа, а лучше отрезая мелкозубой, например ленточной, пилой с наружной (призаболонной) пласти образца (см. рис. 134, *з*). Толщина отделяемого слоя от 3—5 мм (меньше — в самом начале процесса) до трети толщины доски (в конце сушки). По направлениям и величине возникшего прогиба устанавливают стадию сушки (первая — см. рис. 134, *д*, вторая — см. рис. 134, *е, ж*), а также относительную величину внутренних деформаций — упругой U и влажностной B .

Относительную величину упругой деформации U_c выявляют методом измерения наружного слоя немедленно после его отделения по величине образовавшейся стрелы прогиба f при его длине l :

$$U_c = 100f/l^2. \quad (236)$$

После выравнивания влажности по толщине слоя (например, в сушильном шкафу) величина его стрелы прогиба изменится до значения f_2 . Тогда относительная величина влажностной деформации, характеризующей перепад влажности по толщине слоя, будет [13]:

$$B_c = 100(f_2 - f)/l^2. \quad (237)$$

Суммарная деформация

$$B_c + U_c = 100f_2/l^2. \quad (238)$$

Для сопоставления стрел прогиба в досках разной ширины их следует приводить к одной ширине, например $III = l = 150$ мм, по следующему соотношению:

$$f_n = f150^2/l^2. \quad (239)$$

Так, приведенная стрела прогиба f_n при фактически измеренной $f = 8$ мм на ширине $III = 100$ мм, будет $f_n = 8 \cdot 150^2/100^2 = 18,0$ мм.

Перепад влажности по толщине доски определяется методом, показанным на (рис. 134, б), а для заготовки и бруска — (на рис. 134, в). При этом взвешивают вместе боковые слои и отдельно средний.

В производственных условиях можно не откалывать кромку размером $T/2$ от доски, тогда наружный слой (слева на рис. 134, б) будет одновременно использован для выявления относительных деформаций U_c и B_c методом изогнутого наружного слоя.

Промежуточный прогрев материала

При появлении в материале значительных напряжений (см. рис. 67 и 134, г, д) и опасности растрескивания сушку временно приостанавливают и материал прогревают. Промежуточный прогрев часто называют пропаркой. Это не точно, так как материал прогревается не чистым паром, а смесью пара с воздухом. При $t_m < 99,6^\circ\text{C}$ пускаемый в камеру увлажнительный пар немедленно смешивается с воздухом, повышая его температуру и влагосодержание (см. рис. 13).

При сушке толстого материала промежуточный прогрев во второй половине процесса проводится неоднократно с учетом развития напряжений. В первой стадии сушки промежуточный прогрев способствует нарастанию остаточных деформаций и образованию во второй стадии раковин, и его следует избегать, если только не требуется растянуть в сечении тонкий материал, т. е. уменьшить усадку.

Температуру воздуха во время промежуточного прогрева устанавливают на $6\text{--}10^\circ\text{C}$ выше температуры, поддерживаемой в камере перед прогревом; психрометрическая разность должна исключать возможность испарения влаги из материала.

Равновесная влажность воздуха должна быть на $2\text{--}3\%$ выше, чем средняя влажность материала; ее устанавливают по диаграмме рис. 32.

Промежуточный прогрев материала продолжают до устранения в нем напряжений, т. е. упругих деформаций, что выявляют вырезкой соответствующих образцов (см. рис. 67, б, в). Каждое сушильное хозяйство должно накапливать опыт по продолжительности прогрева высушиваемых сортиментов в своих камерах в зависимости от толщины материала, древесной породы, величины имеющихся упругих деформаций, предъявляемых к нему требований и плотности камер.

При промежуточном прогреве материала вентиль калорифера закрывают полностью или частично в зависимости от давления увлажнительного пара и времени года (охлаждение через ограждения). При неизменном состоянии материала в этот период теплота расходуется только на теплопотери через ограждения. Чем выше давление пара, тем с большим пере-

гревом при дросселировании он поступает в камеру и тем, следовательно, меньшая теплоотдача калорифера требуется для компенсации теплопотерь. Иногда (летом) пар, поступающий в калорифер, перекрывают еще до начала промежуточного прогрева материала.

Перегретый пар непригоден для влаготеплообработки материала. Предпочтителен насыщенный пар низкого давления. Для получения из перегретого или насыщенного пара среднего давления насыщенного пара низкого давления $p < 70$ кПа ($p < < 0,7$ кгс/см²) и одновременно для увеличения количества возвращаемого в котельную конденсата в сушильном цехе желательно установить бойлеры.

В боровных и газовых сушильных установках для получения увлажнительного пара можно применить секционные котлы низкого давления.

При кратковременном (на несколько часов) прекращении подачи пара в калорифер продолжительность процесса сушки почти не снижается. Ни в коем случае в это время нельзя открывать двери; наоборот, во избежание растрескивания влажного толстого материала следует всемерно сократить воздухообмен охлаждаемой камеры (особенно через неплотные двери).

На рис. 135 нанесено реальное протекание внутренних деформаций древесины в производственных условиях (ММСК-1) при сушке ясеневых досок толщиной 40 мм, аналогичное эскизному изображению на рис. 67. Кривые рис. 135, а показывают распределение влажности по толщине материала на 3, 4, 6, 10, 20, 24 сутки от начала сушки; в конце процесса проведена влаготеплообработка материала. На рис. 135, б изображена упругая деформация слоев, замеренная немедленно после их откалывания в эти же моменты сушки. На рис. 135, в представлено дополнительное искривление этих слоев в результате выравнивания их влажности (остаточная деформация).

При высушивании материала до низкой конечной влажности (на рис. 135, справа) все рассмотренные внутренние деформации выравниваются. Эти деформации следует выявлять при высушивании толстых пиломатериалов, тем более твердых пород.

Техника регулирования процесса сушки

Один из дефектов управления работой камер — неправильное использование приточно-вытяжных труб. Воздухообмен должен осуществляться для удаления из камеры только избытка влаги. Иногда трубы держат открытыми и полуоткрытыми, когда по показанию психрометра в воздухе камеры нет избыточной влаги и даже ощущается ее дефицит. Этот недостаток влаги восполняют при открытых приточно-вытяжных заслонках пуском увлажнительного пара. Выбрасывание влаги из камеры

при ее недостатке и возмещение удаляемой влаги увлажнительным паром влекут за собой значительную потерю пара и ухудшают режим сушки, делая его менее устойчивым, более зависящим от давления пара.

Кирпичные сушильные камеры при кажущейся их плотности устройства негерметичны. Большое количество влаги утекает наружу неорганизованными путями (диффузией, термодиффу-

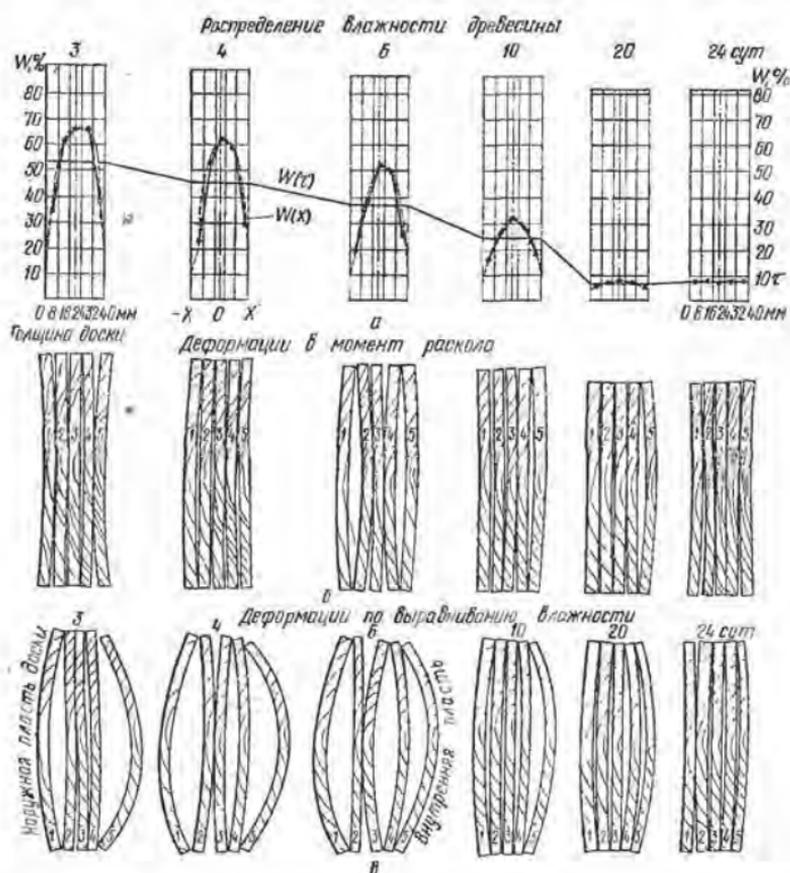


Рис. 135. Действительные закономерности сушильного процесса

зией и молярными потоками) через толщу стен, перекрытия, поглощается и отводится по грунту более холодным полом, теряется через неплотности дверей и шиберов. Зимой, когда это хорошо заметно, можно наблюдать выход пара из вытяжных труб при полностью закрытых подогнанных шиберах. Особенно велики потери влаги через двери, тем более, если они не вполне исправны, и через вытяжные трубы даже с закрытыми шиберами.

Неорганизованный воздухообмен в работающей камере обычно превышает весь расчетный; поэтому воздухообменные

устройства излишни, они создают дополнительную разгерметизацию камер.

Пиломатериалы можно удовлетворительно высушивать только во влажной среде, что отражено в специфических режимах сушки для древесины. Чем выше показание мокрого термометра, тем больше (особенно в первой стадии) температура, а следовательно, теплопроводность древесины, тем быстрее просохнет материал. Именно по этой причине в металлических (т. е. герметичных) камерах, где температура по мокрому термометру $96-99^{\circ}\text{C}$, материал просыхает в несколько раз быстрее, чем в обычных камерах, где температуру по мокрому термометру из-за утечки влаги можно поднять лишь до $60-70^{\circ}\text{C}$. В связи с этим в кирпичных камерах надо стремиться сохранить, сберечь влагу, а не выбрасывать ее. Категорически запрещается одновременно, хотя бы частично, открывать увлажнительный вентиль и заслонки на приточно-вытяжных трубах.

В этих условиях наличие приточно-вытяжных отверстий отрицательно сказывается на эффективности работы камер. В большинстве камер эти отверстия целесообразно наглухо и герметично закупорить, а трубы закрыть также и сверху или удалить совсем. Если при сушке тонких хвойных пиломатериалов в камерах нельзя без добавки увлажнительного пара поднять t_m выше 65°C , такое мероприятие следует немедленно провести; нужно также герметизировать и утеплить двери, перекрытие и пол, уплотнить места ввода в камеру паровых и конденсатных труб и т. п.

Режим сушки корректируют по состоянию упругих деформаций в древесине, а иногда по размерам торцовых трещин; при необходимости процесс форсируют или проводят периодическую влаготеплообработку. Дополнительно анализируют ход процесса сушки по уменьшению массы контрольных отрезков. Для этого немедленно после взвешивания вычисляют их влажность и строят кривую сушки. Если процесс сушки протекает нормально, а контрольный отрезок взвешивается правильно и закладывается точно на прежнее место, кривая сушки должна быть плавной, без резких изменений наклона. Чтобы судить о величине скорости сушки материала и целесообразности замедления или ускорения процесса, полученную таким образом кривую сушки сравнивают с нормальной для данного материала логарифмической кривой, построенной по таблице режима сушки (см. гл. 6).

Кривые сушки некоторых контрольных отрезков могут иметь отклонения из-за особенностей строения древесины, поэтому в ответственных случаях в штабель закладывают и взвешивают три контрольных отрезка. Надо учитывать, что в контрольных отрезках влага уменьшается быстрее, чем в материале в середине штабеля.

Если в зимнее время в камеру не подается нужное количество пара (вследствие чего заданный режим сушки может нарушаться), рекомендуется сохранять заданную психрометрическую разность для каждой ступени режима или слегка уменьшать ее, учитывая, что при пониженной температуре материала скорость продвижения влаги по его сечению к поверхности замедляется.

В крайние камеры и туннели сушильного блока загружают более толстый материал, нуждающийся в меньшем часовом количестве тепла и воздуха. Необходимо автоматизировать реверсирование циркуляции воздуха по материалу, а также выполнение прерывистых режимов сушки. В этих целях применяют командные приборы КЭП-12У, схемы с двумя реле времени РВ4-4 или программное реле В51-6 (до В51-10), выпускаемые Киевским заводом реле и автоматики.

73. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОВЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Процесс испарения влаги из материала протекает практически одинаково как в воздухе, так и в среде продуктов сгорания, если их температуры, психрометрические разности и скорости по материалу одни и те же. Поэтому в противоточных туннелях качество сушки материала будет одинаковым, режимы сушки для них общие.

Методы регулирования процесса сушки в газовых сушильных установках имеют свои особенности. Должна быть использована специальная инструкция по обслуживанию топки, вентиляторов и системы оборудования [13]. Чем выше температура в топке, тем лучше сгорает топливо. Непременным требованием при этом будет полное химическое (т. е. бездымное) сгорание топлива. Это требование легко соблюдается при сжигании природного газа, а также кускового и дробленого сырого древесного топлива. В последнем случае необходимо, чтобы работающая топка все время была до предельного положения заполнена топливом. Тогда внутренняя поверхность кладки первой половины работающей топки будет поддерживаться в состоянии ярко-красного или даже белого накала. Пламя должно заканчиваться в пределах топочной камеры, т. е. до первой перевальной стенки. Это достигается соответствующей подачей вторичного воздуха (через верхние дверцы); чем больше вторичного воздуха, тем короче пламя. Однако большой избыток воздуха в топке (когда $\alpha > 2,0$) нежелателен из-за охлаждения и осушения газов. При слабом накале стенок топки реакция горения замедляется и газы получаются задымленными.

Необходим периодический инструктаж работающих на топках, а также действенный контроль за их работой.

В газоходах топки должен быть установлен пирометр, показания которого отсчитываются на рабочем месте истопника.

Главное требование к конструкции и состоянию газовых сушильных установок заключается в соблюдении герметичности системы, чтобы подсосы в нее наружного воздуха были минимальными. Это относится к кладке задней половины топки, ее дымовой трубы, главному шиберу, газоходу и его шиберам, дверям сушильных камер или туннелей. При надлежащей герметичности системы повышается температура газов по мокрому термометру, улучшается протекание процесса сушки и исключается опасность загорания материала (при CO_2 более 4%) даже в случае проникновения искр к штабелям материала. Чтобы избежать подсоса воздуха, сушильный агент у всех дверей загрузочного конца туннелей должны быть под небольшим напором, т. е. должен наблюдаться слабый его выход наружу внизу дверей. Двери разгрузочного конца туннелей следует выполнять особо герметичными.

Дополнительный воздух к вентиляторам обычно не подается. Закрывают и вытяжные трубы, если нет выхода наружу сушильного агента внизу дверей загрузочного конца туннелей.

74. КОНЕЧНАЯ ВЛАЖНОСТЬ МАТЕРИАЛА И ОКОНЧАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ

Конечная влажность материала

Влажность древесины в момент изготовления из нее изделий должна соответствовать эксплуатационной влажности, т. е. средней равновесной влажности воздуха, в котором высушенная древесина окажется в условиях эксплуатации. Древесина мебели во влажных условиях восточно-черноморского побережья, например, должна иметь большую влажность, чем в других местах. В одних и тех же климатических условиях влажность древесины, находящейся в неотапливаемых помещениях, будет большей, чем в отапливаемых, а при печном отоплении больше, чем при паровом или водяном.

Состояние воздуха наружного и внутри отапливаемых помещений подвержено сезонным колебаниям; при этом, хотя и более медленно во времени, изменяется влажность древесины. Так, в зимнее время мебель в жилых квартирах, особенно с поверхности, подсыхает, а летом увлажняется. Отставание изменения влажности древесины от равновесной влажности воздуха тем больше, чем значительнее сечение деталей и лучше их теплоизоляционное покрытие в отделанной поверхности.

Для многих изделий влажность древесины нормирована стандартами и техническими условиями. Иногда таких указаний нет, и приходится придерживаться уровня влажности

в сходных изделиях с учетом аналогичных условий их эксплуатации.

Необходимо иметь в виду, что вследствие сострагивания наружного, обычно более сухого, слоя досок и заготовок при изготовлении деталей, а также внесения во многих случаях влаги с клеем и, кроме того, некоторого увлажнения древесины в процессе изготовления изделий влажность древесины, выгружаемой из сушильных камер, должна быть на 2—3% ниже влажности, указанной техническими условиями для деталей в готовых изделиях. Требования к влажности (%) для нестроганных досок или заготовок и для древесины в готовых изделиях следующие:

	Доски и заготовки	Готовые изделия
Паркет, мебель	6	6—8
Внутренние квартирные устройства (двери, наличники, сиденья, шкафы и т. д.)	6	6—8
Столярные плиты	6	7—8
Окна, доски пола	10	12
Музыкальные инструменты	5	6—7
Приборы и их футляры	5	7
Спортивный инвентарь, детали обострения	8—10	10—12
Детали автомобилей и сельскохозяйственных машин	10—12	12—15
Внутренние детали пассажирских вагонов	8	10
Детали товарных вагонов	15	18
Клеевые конструкции	6—10	8—12
Бочки:		
для масла минерального	7	9
для вин, пива, соков	15	18
для хлорной извести	10	12
Ящики:		
для продовольственных товаров	15	18
для транспортировки тяжелых грузов	17	20
Пиломатериалы транспортной влажности	16—20	—
Покрытия паркетных досок перед приклеиванием [42]	3±1	—
Стружка в производстве древесностружечных плит:		
для наружного слоя	—	3—5
для внутреннего слоя	—	1—3

Древесину, предназначенную для изделий, используемых в отопляемых помещениях, следует высушивать до влажности 5—6% и даже ниже; принятая для мебели влажность древесины в деталях $8 \pm 2\%$ сильно завышена (нежелателен и даже опасен плюсовой допуск).

Так как возможна усушка древесины в изделиях, во избежание ослабления шиповых соединений древесина шипа должна иметь пониженную влажность по сравнению с влажностью древесины гнезда. В этих целях рекомендуется оторцованные сухие заготовки подвергнуть в пачках длительной торцовой досушке в камерах, только затем нарезать шипы.

Недосушка материала опаснее по последствиям, чем пересушка. Недосушенная древесина медленно отдает влагу в условиях эксплуатации окончательно изготовленных изделий, а это приводит к сокращению поперечного сечения деталей, их деформации, расслаблению и нарушению соединений, ухудшению качества и быстрой порче изделий. Стоимость сушки древесины 1—2% стоимости изделий, поэтому недосушка ее ничем не может быть оправдана. Особенно опасна недосушка древесины для изделий, подвергаемых в условиях эксплуатации механическим воздействиям (мебель, окна, двери, тара, детали сельскохозяйственных машин, вагонов, автомашин и др.).

Окончание сушки пиломатериалов и их кондиционирование

Время окончания сушки устанавливают по влажности контрольных отрезков и не менее чем по трем образцам влажности, отбираемым из выявленного ранее места более медленного просыхания материала, например в середине штабеля.

При окончании сушки хвойных и мягких лиственных материалов по I и II категории качества сушки, а также всех пиломатериалов твердых лиственных пород высушенную древесину кондиционируют (см. § 41) методом конечной влаготеплообработки. При этом спадают упругие деформации (напряжения) и выравнивается влажность как по толщине материала, так одновременно и в объеме штабеля. Режимные параметры кондиционирования следующие: температура среды на 5—8°С выше, чем в конце сушки, а $\varphi = 0,95 \dots 1,0$.

Продолжительность кондиционирования t_k зависит от древесной породы, назначения и толщины материала. Приближенно можно считать, что длительность кондиционирования составляет 3—5% от продолжительности сушки быстро сохнущего материала (до 5 сут) и 5—8% — медленно сохнущего.

Согласно ГОСТ 19773—74 продолжительность конечной обработки пиломатериалов, подлежащих последующей механической обработке по I-му и 2-му классам точности (соответственно по I и II категориям качества сушки), определяется толщиной материала и породой. Зависимость продолжитель-

ности обработки от толщины материала (в диапазоне $T = 25 \dots 60$ мм) близка к линейной. Для группы древесных пород: сосны, ели, пихты, осины, тополя, кедра и липы на каждый сантиметр увеличения толщины материала выше 2,5 см дается 3 ч; березы и ольхи — 6 ч; лиственницы — 8 ч; бука, клена, ясеня и вяза — по 8,5 ч; дуба и граба — по 10 ч. Так, для сосны толщиной $T = 5,5$ см продолжительность обработки t_k будет (5,5—2,5) 3—9 ч, а для дуба (5,5—2,5) 10—30 ч.

Психрометрическая разность устанавливается в 1°C , независимо от конечной влажности материала (что недостаточно логично). Если психрометрическая разность выдерживается $3\text{--}4^\circ \text{C}$, продолжительность обработки увеличивают в 1,7—2 раза. Очевидно, более точным критерием окончания обработки должно быть состояние материала — прямолинейность слоев (см. рис. 67, К), после выравнивания их влажности (в сушильном шкафу).

По окончании кондиционирования толстый материал оставляют в закрытой выключенной камере; при охлаждении из него удаляется часть оставшейся влаги. Продолжительность такого охлаждения около 0,5 от продолжительности нагрева материала (см. § 71). Затем приоткрывают двери и дополнительно оставляют материал в камере на время 0,2—0,3 от продолжительности нагревания. При охлаждении толстого материала со значительной конечной влажностью возможен пуск в камеру в небольшом количестве увлажнительного пара, задерживающего пересыхание поверхности охлаждаемого материала. Если горячий полусухой материал в зимнее время выгрузить из камеры наружу, будет слышно растрескивание охлаждаемых досок из-за интенсивного испарения влаги в холодный воздух с очень низким парциальным давлением пара, в то время как давление пара на поверхности полусухого нагретого материала будет значительным (см. рис. 58). Тонкий материал оставляют в отключенной камере 1—2 ч и затем выгружают на склад.

До поступления в производство материал должен окончательно охладиться на складе (тонкий — 1 сут, а толстый — не менее 2 сут) в сушильных штабелях. При таком окончательном охлаждении фиксируется почти плоская форма материала, зажатого прокладками. В случае же разгрузки теплого материала возникнет дополнительное коробление, искривление и т. п. освободившихся от зажатия досок, не достигших еще более жесткого стабильного состояния.

Не следует оставлять сухой и особенно тонкий материал на длительный период в сушильных штабелях. Если в высушенном материале частично отпала потребность, его следует уложить на складе в плотные стопы. Оставляемые в запас сухие пиломатериалы во избежание последующего увлажнения окружающим воздухом, возможности быстрого загорания и уменьшения габаритного объема (пакет вместо штабеля) следует хранить

в плотных пакетах, закрывая торцы, которые быстрее поглощают влагу. Это относится также к хранению сухих заготовок, которые укладывают в плотные стопы, впритык по длине, с сомкнутыми торцами и закрывают брезентом.

У охлажденной древесины выравнивание влажности и релаксация напряжений протекают очень медленно, поэтому склад предназначается для хранения, а не для выдержки древесины. Если необходима выдержка (т. е. частичное кондиционирование) пиломатериалов на складе (особенно при туннельной сушке), их в горячем состоянии как можно быстрее складывают в стопу, утепляемую со всех сторон и сверху (например, брезентом и затем в 2—3 ряда тонкими досками) и особенно тщательно с торцов. Такой склад должен быть закрытым и отапливаемым.

Указания по безопасной работе в лесосушильных цехах приведены в «Правилах по технике безопасности и производственной санитарии в деревообрабатывающей промышленности» (3-е изд. Лесная промышленность, М., 1976, с. 209).

75. ДЕФЕКТЫ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ И ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Дефекты сушки многообразны по содержанию и происхождению. Основные, наиболее распространенные дефекты — недосушка всего штабеля пиломатериалов, неравномерное их просыхание по объему штабеля и по толщине сортимента, недопустимо большое коробление пиломатериалов во время сушки, а также растрескивание. Последние два дефекта считаются браком сушки, а первый — невыполнением процесса. Далее приведены основные дефекты сушки и их предупреждение.

1. Недосушка древесины происходит при досрочной выгрузке пиломатериалов из камер или туннелей при неудовлетворительном контроле процесса сушки или преднамеренном нарушении технологии сушки (например, из-за срочной потребности в материале). Для соблюдения требуемой влажности в штабель закладывают контрольные отрезки, составляют по ходу процесса графики кривых сушки, отбирают 3—5 проб на влажность перед выгрузкой материала. Необходим систематический контроль ОТК предприятия за соблюдением технологии сушки.

2. Неравномерное просыхание материала по длине штабеля является следствием неравномерной раздачи воздуха или его нагрева по длине камеры, а также неудовлетворительного состояния дверей. Надлежит отрегулировать равномерность распределения воздуха и его нагревания, а также заменить двери на утепленные, герметичные.

3. Неравномерное просыхание по ширине штабеля наблюдается при слабом движении воздуха; необходимо экранировать штабель для избежания перетекания воздуха помимо

материала, а также увеличить подачу воздуха вентиляторами. В качестве паллиативного решения применяют разреженную укладку материала в местах его недосыхания.

4. Неравномерное просыхание по высоте штабеля происходит из-за несоблюдения вертикальности рядов шпаций (в камерах с естественной циркуляцией воздуха) и слабой циркуляции воздуха. Необходимо улучшить укладку пиломатериалов штабель (см. § 68) и модернизировать сушильные камеры.

5. Неравномерное просыхание по объему штабеля наблюдается при слабой циркуляции воздуха (см. п. 3), укладке в штабель разных сортиментов, сдвоенной укладке пиломатериалов, применении широких (более 40 мм) заготовок в качестве прокладок, укладке заготовок в клетку с частыми прокладками и др. Такие дефекты укладки не допускаются (см. параграф 68).

6. Неравномерное просыхание по толщине материала возникает с применением форсированного процесса сушки при значительной конечной влажности древесины. Необходимо проведение конечной влаготеплообработки, обязательной для пиломатериалов I и II качественной категории (см. параграфы 41 и 55).

7. Коробление материала во время сушки как продольное, так и поперечное — следствие плохого его зажатия, т. е. неудовлетворительной его укладки в штабель. Основные требования к укладке: одинаковая толщина прокладок, достаточно частое их расположение, вертикальность их рядов (см. § 68), прижатие верха штабеля.

8. Коробление материала после сушки происходит при наличии внутренних влажностных и упругих деформаций (см. п. 6), а также разгрузки штабелей с неостывшим материалом, тем более без его конечной влаготеплообработки.

9. Растрескивание торцов и пластей материалов происходит при форсированном процессе в начале сушки; необходимо тщательно контролировать упругие деформации; смягчить режим сушки [35]; защищать торцы [64].

10. Возникновение раковин во второй стадии из-за форсированного процесса в первой стадии. Надлежит проводить промежуточную влаготеплообработку материала во II стадии.

11. Плесень на материале появляется при застойной циркуляции воздуха. Рекомендуется усилить движение воздуха, повысить его температуру, применить влаготеплообработку.

ГЛАВА 12. КАЧЕСТВО СУШКИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

76. НОРМАЛИЗАЦИЯ КАЧЕСТВА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Категории качества сушки

Нормативами по камерной сушке пиломатериалов [53] с учетом неодинаковых производственных условий и технологии механической обработки древесины различного назначения установлены четыре категории качества сушки.

Категория I — высококачественная сушка материала, соответствующая механической обработке деталей по 12-му качеству СТ 45—73 «Изделия из древесины и древесных материалов. Допуски и посадки», с полным сохранением при сушке его механических свойств. Такой материал не должен подвергаться температурному воздействию выше 60—70° С (60° С относится к толстым пиломатериалам). По этой качественной категории высушивают древесину для приборостроения, производства моделей, лыж, обозных деталей, музыкальных инструментов и др.

Категория II — повышенное качество сушки материала, соответствующее механической обработке деталей по 13-му качеству с сохранением при сушке механических свойств древесины (допускаемое снижение прочности на скалывание и ударный изгиб не более 5%). Высушивается древесина при температуре до 75—85° С. Используют ее в столярном и мебельном производствах, пассажирском вагоностроении, автостроении, сельхозмашиностроении и т. д.

Категория III — среднее качество сушки, соответствующее механической обработке деталей по 15-му качеству, с допускаемым техническими условиями незначительным снижением прочности древесины. Применяют такую древесину в грузовом вагоностроении, строительстве (кроме изготовления окон, дверей и деревянных ферм), в производстве тары и др., когда не требуется взаимозаменяемости при сборке.

Категория 0 — сушка экспортных пиломатериалов и внутрисоюзного потребления до транспортной влажности 16—20% (меньшая влажность — для тонких пиломатериалов).

Показатели качества сушки

Покоробленность и растрескивание материала — брак сушки.

К признакам качества сушки относят: соответствие средней по сечению влажности высушенных пиломатериалов влажности, заданной техническими условиями на изготовление изделий; величину отклонения влажности древесины в штабеле (в раз-

личных его зонах) от средней влажности материала; величину перепада влажности древесины по толщине доски или заготовки; величину упругих деформаций в высушенном материале. Качество сушки резко улучшается при конечной влаготеплообработке материала. Без конечной влаготеплообработки влажность материала в отстающей зоне по просыханию штабеля, подлежащего выгрузке из сушильного туннеля, должна быть на 2—3% ниже заданной техническими условиями на влажность древесины в изделиях.

24. Допускаемые отклонения конечной влажности высушенных пиломатериалов в штабеле и перепад влажности по их толщине

Категория качества сушки	Средняя влажность древесины, %, и допускаемые ее отклонения при условиях эксплуатации изделий:			Допускаемый перепад влажности, %, при толщине материала, мм				Допускаемые температуры процесса сушки	Необходимость кондиционирования материала
	в сухом воздухе (центральное отопление)	во влажном воздухе (лучное отопление)	в неотапливаемых помещениях	13—22	23—40	41—60	61—90		
I	7 ± 1	10 ± 2		1,5	2,0	2,5	3,0	Пониженные температуры	Тщательное кондиционирование
II	$7 \pm 1,5$	10^{+2}_{-4}	15^{+3}_{-6}	2,0	3,0	3,5	4,0	Обычные температуры	Кондиционирование
III	7 ± 2	10^{+2}_{-6}	15^{+3}_{-8}	2,5	3,5	4,0	5,0	По техническим условиям допускается форсированная сушка	Проводится по техническим условиям
0	—	—	16 ± 6 (тонкие) 18 ± 4 (средние) 20 ± 4 ² (толстые)	Не контролируется				Сушка атмосферная и низкотемпературная	Не требуется

В табл. 24 приводятся допускаемые отклонения конечной влажности высушенных пиломатериалов и перепад влажности по их толщине. При повышенных отклонениях влажности по сравнению с приведенными необходимо отрегулировать циркуляцию воздуха в камере и по материалу, изменить укладку материала и применить (или удлинить) конечную влаготеплообработку древесины. Величины допустимых перепадов влажности по сечению материала зависят от его толщины и качественных требований; в табл. 24 приведены значения этих перепадов влажности.

При сушке по I и II категориям в камерах перепады влажности материалов контролируют из каждой выгружаемой партии, в сушильных туннелях — из каждого штабеля. При сушке по III категории перепад влажности контролируют в случаях, когда высушенный материал подвергается ребровой распиловке (правильнее такую распиловку проводить до сушки) и устанавливают количественно, как и по II категории. Число отбираемых проб из зоны с замедленной сушкой — не менее трех.

Методы контроля внутренних деформаций

Методом изогнутого наружного слоя контролируют опасность возникновения трещин в процессе сушки на наружной пласти доски (см. рис. 134, *г, д, е*). В высушенном материале наружные трещины дополнительно не возникают, но реальна опасность его последующего различного деформирования. Поэтому для установления показателей по табл. 24 применяют методы, характеризующие состояние $\frac{1}{3}$ (или $\frac{1}{2}$) сечения материала, с отделением более толстого слоя. Эти методы были представлены на рис. 67, 68 и 134. Подлежит выявлению *перепад, т. е. максимальная разность* внутренних деформаций, в наружной и внутренней зоне материала.

Величина упругих деформаций U не нормировалась. Между тем это необходимо. Производственный контроль касательных внутренних деформаций U и B рекомендуется проводить двумя методами: по изгибу отделенного наружного слоя, образующего стрелу прогиба f (см. рис. 67, *б, 1*) и по отклонению зубцов в вырезанной двузубой вилке на величину F (см. рис. 67, *б, 4*). Первый метод контроля следует применять при сушке досок, а второй — при сушке брусковых сортиментов (см. рис. 67, *б, 4*).

Сравнивая оба эти метода применительно к доскам, можно отметить меньшую надежность второго из-за возникновения специфического прикромочного эффекта. В зоне кромки доски возникают сложные внутренние деформации. При опытном определении F измеряется не только изгиб зубца из-за усредненных напряжений в доске, но и отклонение зубца у его основания вследствие прикромочного эффекта, результаты действия которого показаны на рис. 67, *б, 4*.

Суммарный учет внутренних деформаций

Во второй стадии сушки влажностные B и упругие U деформации можно учитывать суммарно (см. рис. 65, б). За счет уменьшения перепада влажности в процессе сушки возрастают упругие деформации (если не происходит релаксация напряжений, замедляющаяся в сухой древесине, снижающая сумму $B+U$).

Градиент упругой деформации поверхностной зоны U_c измеряют по методу отделения наружного слоя немедленно после его откалывания (236). Градиент влажностной деформации B_c измеряют разностью $f_2 - f$ (237) после выравнивания влажности по толщине слоя. В результате приведения к условной длине слоя f_n (239) можно количественно сопоставлять B_c и U_c для различных сортиментов в разных процессах сушки.

Для нахождения по градиенту влажностной деформации полного ее значения с учетом имеющейся толщины материала T используют (165), написанное в виде $\Delta_w = \text{tg } \alpha T/4$. Вместо $\text{tg } \alpha$ может быть принята пропорциональная ему величина $f_2 - f$, приведенная к условной ширине (150 мм). Следовательно, перепад влажности по толщине материала (см. табл. 24) найдется в функциональной зависимости от f и T . Аналогичными будут зависимости упругих деформаций U от f и T [10].

Таким образом, вместо трудоемких измерений перепадов влажности в текущей работе по контролю качества сушки пиломатериалов можно пользоваться простым по технике измерения и достаточно достоверным методом измерения обеих внутренних деформаций U и B . Метод получил практическую проверку с положительными результатами.

Ориентировочные значения наибольшей допускаемой стрелы прогиба f_2 слоя при его длине l и толщине досок $T=40$ мм следующие:

l , мм	80	100	120	140	150	160	180	200	250	300
f_2 по I категории качества сушки, мм .	0,6	1	1,5	2	2,2	2,5	3,2	4	6	9
То же, по II категории, мм	1,2	2	3	4	4,5	5	6,5	8	12	18

Здесь суммарно показаны обе деформации — упругая и влажностная. Базовая длина слоя принята $l_0=150$ мм. Для иной длины слоя l и толщины досок T используется приведенная f_2 (рис. 136, 134 и 67, б, 1)

$$f_2 = a l^2 / T, \quad (240)$$

где a — коэффициент, принимаемый 0,004 для I категории качества сушки и 0,008 — для II; значение f_2 обратно значению толщины материала T [10].

Изменение деформаций предела прочности древесины в тангентальном направлении в условиях сушки и одновременное отклонение модуля упругости примерно взаимно уравновешиваются [см. (108) при $\tau=0$].

Например, для сосновых досок толщиной $T=40$ мм и шириной $l=150$ мм, высушенных по I качественной категории, получим допустимую величину $f_2=0,004 \cdot 150^2/40=2,2$ мм.

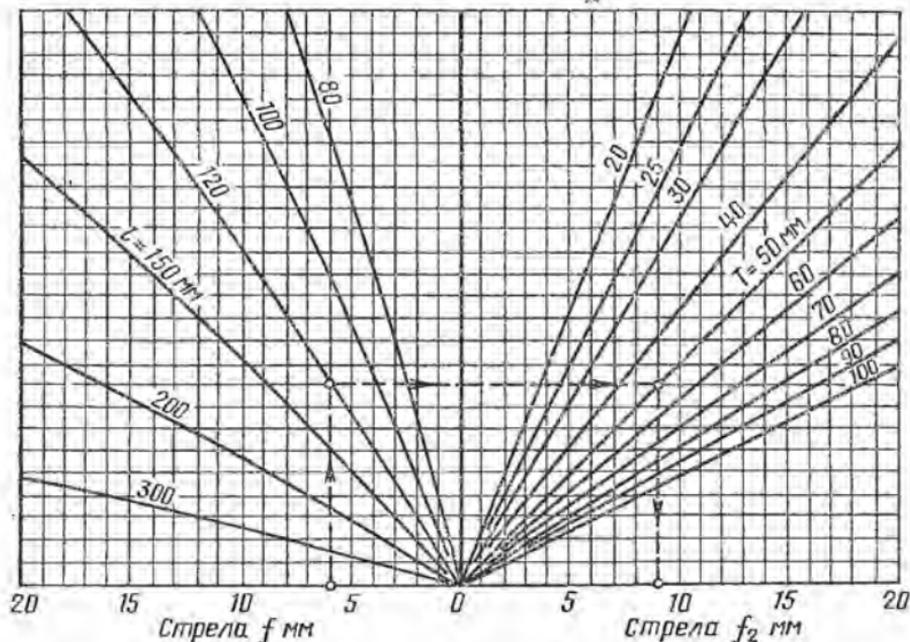


Рис. 136. Диаграмма для определения приведенной стрелы прогиба при измерении внутренних деформаций

77. УСЛОВНЫЙ МАТЕРИАЛ

Пиломатериалы как объект сушки очень разнообразны по древесной породе, сечениям, качественным требованиям к сушке, влажности, так же как различны и условия их высушивания и т. д. Продолжительность сушки варьирует в пределах от нескольких часов до нескольких недель, поэтому необходима унификация и нормализация методов расчета и учета лесосушильного производства. Для этого установлена неизменная нормативная учетная единица — *условный материал*.

Условным материалом считаются *сосновые обрезные доски* толщиной 50 мм, длиной более 1 м, шириной 150 мм, с начальной влажностью 60 и конечной 12%. В настоящее время в среднем выпиливают более тонкий материал, начальная его влажность стала выше, а конечная ниже, сушильные камеры

с естественной циркуляцией воздуха почти не применяются и т. д. Это требует уточнения учетной единицы.

Желательно принять в качестве базовой толщины условного материала средневзвешенную толщину досок внутрисоюзного потребления 35—40 мм. Материал толщиной 40 мм указан в ГОСТ 8486—66; этот размер находится на границе толстых досок, его следовало бы принять в качестве условного для нормативов.

В соответствии с исследованиями нормальной должна считаться скорость воздуха по высушиваемому материалу не менее 2 м/с, что достигается в новых камерах (взамен 1 м/с в прежних нормативах). При этом сократится продолжительность сушки материала.

Желательно также, чтобы в условном материале отношение начальной влажности к конечной было единичным, т. е. логарифм отношения начальной влажности к конечной был равен 1,000. Этому условию отвечает отношение начальной влажности к конечной 10/1, т. е. $w_n/w_k = 100/10 = 90/9 = 80/8 = 75\%/7,5\%$ и т. д.

Однако будем считать условным материалом учетную нормативную единицу. Этот материал, уложенный на прокладки толщиной 25 мм, должен просыхать применительно к требованиям II категории качества сушки в камерах с поперечной реверсивной циркуляцией воздуха 5 сут.

78. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Исходные физические параметры, определяющие продолжительность сушки, пока не раскрыты. Не изучена миграция свободной влаги, составляющей в древесине более $\frac{3}{4}$ удаляемой влаги. Неизвестно влияние внутренних деформаций во второй стадии процесса на допустимую скорость сушки. Нет надежных научно-технических сведений о скорости просыхания брусковых материалов с двухмерными потоками влаги в различных их соотношениях. Таким образом, должная научная база для теоретического расчета процесса сушки еще недостаточна, поэтому необходимо пользоваться для определения продолжительности сушки пиломатериалов лабораторными и производственными данными, накопленными как у нас, так и за рубежом на протяжении ряда десятилетий, многократно проверенными и соответственно математически обработанными.

Достаточно надежны нормативные расчетные коэффициенты, сведенные в таблицы. Коэффициенты постепенно уточняются. Возможна дополнительная их корректировка, особенно в связи с переходом на сушку пиломатериалов, в установках с высокими скоростями воздуха. Такого рода уточнения в своей основе логичны и полезны для производства.

Ниже приведены основные учитываемые факторы и соответствующие им коэффициенты A для расчета продолжительности сушки:

1. При наличии всех свойств, составляющих характеристику условного материала, продолжительность сушки древесины разных пород:

Ель, пихта	4,5/0,9
Сосна, кедр, осина, липа	5/1,0
Береза, ольха	7/1,4
Клен, бук, ясень, лиственница	20/4,0
Дуб, граб	30/6,0

Примечание. В числителе — продолжительность сушки в сутках, в знаменателе — коэффициент A .

2. Влияние толщины материала на продолжительность сушки учитывалось линейной ее зависимостью для тонкого материала и полуторной степенью для толстого. Это практически обосновано ранее в камерах с естественной циркуляцией, где для тонкого материала поступало недостаточное количество воздуха и тепла, поэтому процесс сушки задерживался (см. рис. 83).

В большинстве действующих камер и сушильных туннелей циркуляция воздуха по материалу побудительная, поэтому нет необходимости в назначении для тонких материалов заниженных расчетных параметров по толщине. Целесообразно принять одинаковую закономерность продолжительности сушки как для толстых, так и для тонких пиломатериалов в среднем в полуторной степени от их толщины.

Квадратичная зависимость характерна только для последнего этапа сушки толстого материала с постоянной его теплопроводностью, когда удаляется лишь связанная влага и закономерности теплопроводности приближаются к закономерностям теплопроводности. Однако и в этом узком конечном диапазоне сушки квадратичная зависимость не учитывает развития в древесине внутренних деформаций, вынуждающих неожиданно, по ходу процесса, изменять его скорость. Поэтому для последнего этапа сушки показатель степени в соответствии с практикой должен быть принят в среднем 1,5. При этом коэффициент толщины A_T определяется по формуле

$$A_T = (T/50)^{1,5} = \sqrt{T^3/50^3} = 0,00283 \sqrt{T^3} \quad (241)$$

В результате расчета получим:

T , мм	13	16	19	{ 22	25	32
A_T	1,132	0,181	0,234	0,292	0,350	0,510

T , мм	40	50	60	75	100	130
A_T	1,715	1,000	1,314	1,83	2,83	4,19

3. Влияние ширины $Ш$ материала на продолжительность сушки ранее учитывалось многоступенчатыми коэффициентами. Практика показала нецелесообразность и даже ошибочность такого дробления и усложнения расчетов, поскольку доски разной ширины выпиливают одновременно, высушивают общим режимом и загружают вместе в камеры. При укладке без шпаций кромки затеняются смежными кромками досок, поэтому нельзя учитывать их поверхность как испаряющую. Достаточна разбивка на три группы: брусковые материалы, когда $(Ш/Т) < 2$, обычные доски $2 < (Ш/Т) < 5$ и очень широкие $(Ш/Т) > 5$, а также необрезные. Коэффициенты $A_{ш}$ продолжительности сушки приняты для них соответственно 0,8; 1,0 и 1,25.

4. Влияние качества сушки на продолжительность процесса учитывают по качественным категориям I, II, III и 0 коэффициентами соответственно 1,2; 1,0; 0,9 и 0,8.

5. Влияние циркуляции воздуха по материалу на продолжительность сушки материала зависит от типа сушильной установки и учитывается следующими коэффициентами $A_{ц}$:

а) с естественной циркуляцией в камерах «Грум», Некар и др., а также очень слабой (до 0,3 м/с) нереверсивной циркуляцией воздуха по материалу для очень тонкого материала мягких пород $A_{ц} = 2,6$, для тонкого материала ($T = 22 \dots 32$ мм) 2,0, для толстого материала 1,5;

б) со слабой побудительной реверсивной циркуляцией воздуха (около 0,5 м/с) в камерах с продольными валами, устаревших эжекционных и т. д. при потребляемой вентиляторами мощности менее 5 кВт на штабель для очень тонкого материала мягких пород 1,8, для тонкого ($T = 22 \dots 32$ мм) 1,5, для толстого материала 1,3;

в) со средней интенсивности реверсивной циркуляцией воздуха при скорости 1—2 м/с в камерах с поперечными валами, модернизированных эжекционных и т. д., при потребляемой вентиляторами мощности 5—8 кВт на штабель, а также в противоточных туннелях (в том числе с зигзагообразной циркуляцией) для очень тонкого материала мягких пород 1,5, для тонкого 1,2, для толстого материала (в том числе с прерывистой циркуляцией) 1,0;

г) с интенсивной циркуляцией ($v > 2$ м/с) в новых камерах при потребляемой вентиляторами мощности более 10 кВт на штабель для очень тонкого материала мягких пород 1,2, для тонкого 1,0, для толстого материала (в том числе с прерывистой циркуляцией) 0,9.

6. Влияние начальной w_n и заданной конечной w_k влажности определяется логарифмической зависимостью [см. (180)]

и выражается соотношением $A_v = 1,43 \lg (\omega_n / \omega_k)$, (242). Например, если $\omega_n = 60\%$, а $\omega_k = 12\%$, $A_v = 1,43 \cdot 0,70 = 1,0$.

Продолжительность сушки τ (сут) равна произведению рассмотренных коэффициентов на продолжительность сушки условного материала (5 сут, или 120 ч). Для обычных досок

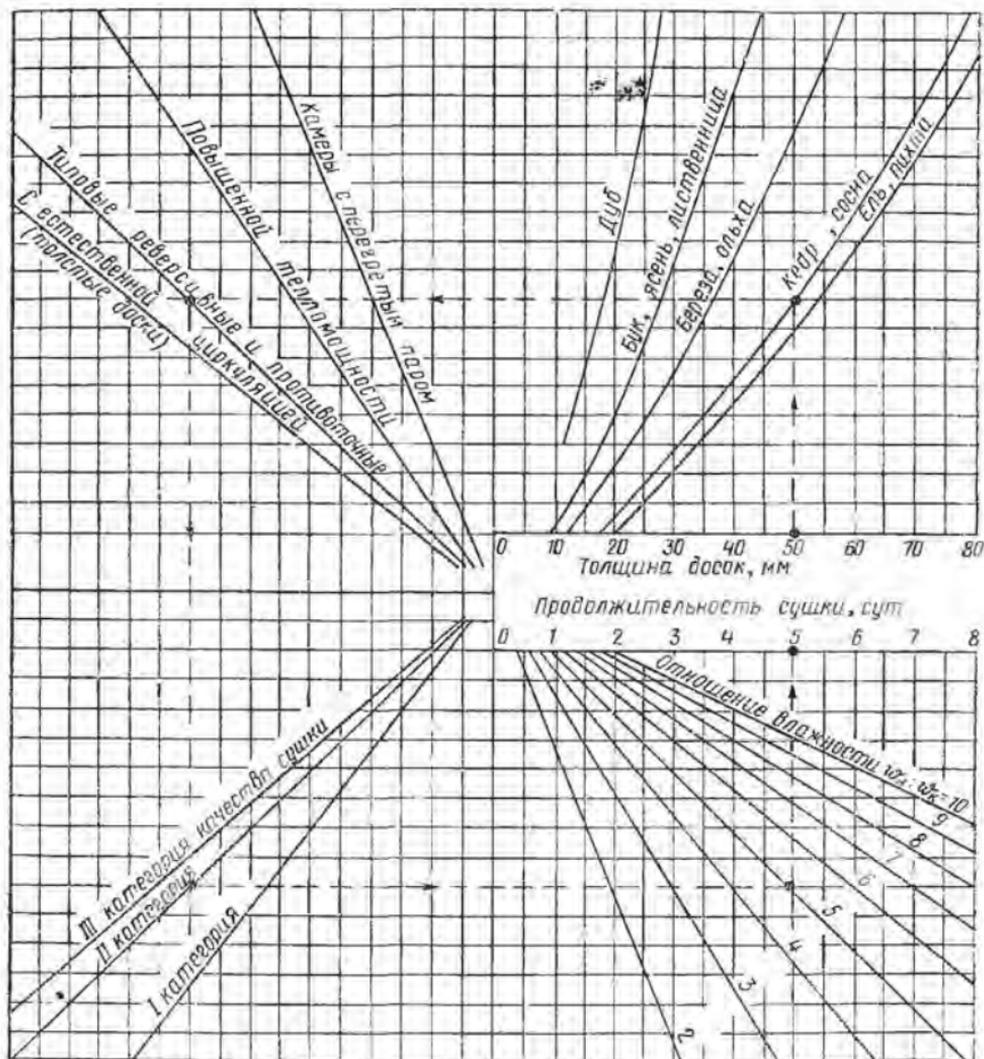


Рис. 137. Диаграмма для определения ориентировочной продолжительности сушки пиломатериалов

$\tau = 120 A_n A_T A_K A_C A_v$ (5 коэффициентов), а для брусков и широких досок $\tau = 120 A_n A_T A_{ш} A_K A_C A_v$ (6 коэффициентов), (243).

Пример. Дубовые ($A_n = 6$) бруски толщиной 32 мм ($A_T = 0,51$, $A_{ш} = 0,8$) высушиваются по II качественной категории ($A_K = 1$) в обычных камерах (со скоростью воздуха 1—2 м/с, т.е. $A_C = 1$) от начальной влажности 72 до

конечной 8%. Требуется определить продолжительность сушки в часах: $\tau = 120 \cdot 6 \cdot 0,51 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \lg 9 = 293 \cdot 0,954 = 279$ ч, или 11,6 сут.

В расчетную продолжительность сушки включается время на прогрев материала, конечное кондиционирование и предварительное охлаждение в камере; наибольшее влияние оказывает порода и толщина материала (рис. 137). Если в камере длительно (например, зимой) не выдерживаются нормальные температурные условия, продолжительность сушки учитывается обратно квадрату усредненной за процесс температуры.

Например, если при заданной режимной температуре $t = 70^\circ \text{C}$ материал просыхает за $\tau = 144$ ч, при пониженной температуре $t_1 = 60^\circ \text{C}$ продолжительность сушки будет

$$\tau_1 = \tau t^2 / t_1^2 = 144 \cdot 4900 / 3600 = 196 \text{ ч.}$$

При высушивании пиломатериалов низкотемпературными режимами расчетную продолжительность сушки удваивают, а форсированными — умножают на 0,8. При высушивании заготовок неправильной формы продолжительность сушки и производительность камер устанавливают по длительным практическим данным или опытным наблюдениям.

79. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУШКИ ПО СУММЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Трудоемкие расчеты продолжительности сушки пиломатериалов путем перемножения коэффициентов можно упростить и сократить, если умножение коэффициентов заменить сложением их логарифмов, которые также считать коэффициентами. После выполнения необходимых предварительных расчетов можно составить табл. 25, 26 и 27 для выборки и суммирования нужных цифр. При этом четыре коэффициента попарно объединяются в две таблицы. За ноль приняты минимальные значения учитываемых факторов.

В табл. 28 приведена сумма S коэффициентов, выбранных из табл. 25—27, по которой находится искомая продолжительность сушки. В табл. 25—28 значения для условного материала выделены квадратами.

Для упрощения подсчетов в таблицы не включено влияние применения низкотемпературных ($t < 50^\circ \text{C}$) режимов сушки или сушки паровоздушной смесью ($t_m = 85\text{—}97^\circ$), в табл. 28 соответственно добавляют 30 или вычитают 10 единиц; при этом метод пользования табл. 25—27 сохраняется.

25. Коэффициенты продолжительности * сушки досок в зависимости от породы и толщины материала

Толщина материала, мм	Коэффициенты продолжительности сушки для					Относительная величина τ
	ели, пихты	сосны, кедра, осины, липы	березы, ольхи	бука, клена, ясеня, лиственницы	дуба, граба	
13	0	4	19	65	82	0,132
16	14	18	33	79	96	0,180
19	25	29	44	90	107	0,234
22	33	37	52	98	115	0,292
25	43	47	62	108	125	0,353
32	49	53	68	114	131	0,511
40	73	77	92	138	155	0,715
50	88	92	107	153	170	1,00
60	100	104	119	165	182	1,31
75	114	118	133	179	196	1,83
100	133	137	152	198	215	3,54
130	150	154	169	215	232	4,18
150	159	163	178	224	241	5,20

* Для брусков коэффициенты уменьшают на 10 единиц, для широких и необрезных досок увеличивают на 10 единиц.

26. Коэффициенты продолжительности сушки для разных категорий качества сушки в зависимости от циркуляции воздуха в различных камерах

Интенсивность циркуляции воздуха (тип камер)	Толщина материала	Коэффициенты продолжительности сушки для категорий качества			
		I	II	III	0
Естественная циркуляция (камеры «Грум», Некар и др.)	Очень тонкий	98	90	86	81
	Тонкий (22—32 мм)	86	78	74	69
	Толстый	74	66	62	57
Слабая побудительная (камеры с продольными валами и устаревшие эжекционные)	Очень тонкий	78	70	66	61
	Тонкий (22—32 мм)	70	62	58	53
	Толстый	64	56	52	47

Интенсивность циркуляции воздуха (тип камер)	Толщина материала	Коэффициенты продолжительности сушки для категорий качества			
		I	II	III	0
Циркуляция средней интенсивности (камеры с поперечными валами и модернизированные эжекционные, противочные туннели)	Очень тонкий	71	63	59	54
	Тонкий	64	56	52	47
	Толстый	56	48	44	39
Интенсивная циркуляция (камеры с поперечными валами и эжекционные — усовершенствованные)	Очень тонкий	64	56	52	47
	Тонкий	56	48	44	39
	Толстый	56	48	44	39

27. Коэффициенты при начальной и конечной влажности пиломатериалов

Начальная влажность w_n , %	Коэффициенты при конечной влажности w_k , %														
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20	22
15	58	50	45	34	25	15	2	—	—	—	—	—	—	—	—
20	68	62	56	50	45	38	32	25	18	9	—	—	—	—	—
25	75	70	64	60	55	50	45	41	36	30	25	19	6	—	—
30	79	75	70	66	62	58	54	50	46	42	38	34	25	15	2
35	83	79	75	71	67	64	60	57	54	50	47	44	33	29	20
40	86	82	78	75	71	68	65	62	59	56	53	51	44	38	32
45	88	85	81	77	75	72	69	66	63	61	58	55	50	45	40
50	90	87	83	80	77	75	72	69	67	65	63	60	55	51	46
55	92	89	85	83	80	77	75	72	70	68	65	63	59	55	51
60	94	90	87	84	82	79	77	75	72	70	68	66	62	58	54
65	95	91	89	86	84	81	79	77	75	73	71	69	65	61	58
70	96	93	90	88	85	83	81	79	77	75	73	71	67	64	61
75	97	94	92	89	87	85	82	80	78	77	75	73	69	66	63
80	98	95	93	90	88	86	84	82	80	78	77	75	71	68	65
90	100	97	95	92	90	88	86	85	83	81	79	77	75	72	69
100	102	99	97	94	92	90	88	87	85	83	82	80	77	75	72
110	103	101	98	96	94	92	90	88	87	85	84	82	80	77	75
120	104	102	99	97	95	94	92	90	89	87	86	85	82	79	77

28. Продолжительность сушки τ , ч, по сумме C
(коэффициентов из табл. 25—27)

C	τ														
163	36	174	47	189	66	201	88	217	125	233	180	250	270	265	380
164	37	175	48	190	68	202	90	218	130	234	185	252	280	266	390
165	38	176	49	192	70	203	92	220	135	235	190	253	290	267	400
166	39	177	50	193	72	204	94	222	140	236	195	255	300	268	410
167	40	178	52	194	74	205	96	223	145	237	200	256	310	269	420
168	41	180	54	195	76	206	98	225	150	239	210	258	320	270	430
169	42	182	56	196	78	207	100	226	155	241	220	259	330	271	440
170	43	183	58	197	80	209	105	228	160	243	230	260	340	272	450
171	44	185	60	198	82	211	110	229	165	245	240	261	350	273	460
172	45	186	62	199	84	213	115	230	170	247	250	263	360	274	470
173	46	188	64	200	86	215	120	231	175	249	260	264	370	275	480

Примечания: 1. Значения C , выходя за пределы этой таблицы, периодически повторяются, изменяясь на 100; продолжительность сушки при этом изменяется в 10 раз. Так, при $C=175$ $\tau=48$ ч, при $C=275$ $\tau=480$ ч, а при $C=375$ $\tau=4800$ ч; при $C=75$ $\tau=4,8$ ч.

2. При изменении C (единиц) на 1; 2; 3; 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 80; 100; τ изменится (кратно) соответственно в 1,02; 1,05; 1,07; 1,12; 1,26; 1,41; 1,6; 2,0; 2,51; 3,16; 4,0; 6,3; 10 раз.

80. РАСЧЕТ ГОДОВОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Годовой объем фактически высушиваемого в камере материала одинаковой характеристики Φ ($\text{м}^3/\text{год}$) равен произведению его количества B (м^3), одновременно загружаемого в камеру (ее вместимость), на число ее оборотов n в течение года:

$$\Phi = nB. \quad (244)$$

Число оборотов камеры n находится делением количества дней ее работы в году (300 с учетом незагрузки материала в воскресные дни и 14 дней на ремонт) на продолжительность сушки τ с учетом времени τ_1 потребного на выгрузку и загрузку материала ($\tau_1 \approx 0,1$ сут):

$$n = 300 / (\tau + \tau_1). \quad (245)$$

Если пиломатериалы в основном высушиваются дольше 5 сут, число дней работы камер в году принимают 335.

Вместимость камеры B равна произведению габаритного объема всех штабелей в камере Γ (м^3) на коэффициент объемного заполнения штабеля материалом K , который равен объему материала (в плотной массе в долях кубического метра), находящегося в 1 м^3 габаритного объема штабеля:

$$B = K\Gamma. \quad (246)$$

При этом габаритный объем штабелей $\Gamma = lbhm$, где l — длина штабеля (обычно 6,6 м); b — ширина штабеля (1,8 м); h — полезная высота штабеля (2,6 м); m — число штабелей в камере или туннеле.

Коэффициент объемного заполнения штабеля K представляет собой произведение трех коэффициентов:

$$K = K_d K_{\text{ш}} K_v, \quad (247)$$

где K_d — коэффициент заполнения штабеля по длине, принимаемый в среднем 0,85; $K_{\text{ш}}$ — коэффициент заполнения штабеля по ширине (для обрезных пиломатериалов в камерах с поперечной циркуляцией равный 0,9; в камерах с естественной и противоточной циркуляцией с продольной штабелевкой материала 0,65; для необрезного материала этот коэффициент уменьшается на $1/3$ и равен соответственно 0,6 и 0,43); K_v — коэффициент заполнения штабеля по высоте; с учетом толщины прокладок 25 мм и объемной усушки пиломатериалов, принятой в среднем 8%, или 0,08:

$$K_v = T/[25 + (1 + 0,08) T]. \quad (248)$$

Подставив эти значения в (247), получим

$$K = 0,85 K_{\text{ш}} T / (25 + 1,08 T). \quad (249')$$

Умножив на габаритный объем штабелей Γ , определим

$$B = 0,85 K_{\text{ш}} T \Gamma / (25 + 1,08 T). \quad (250)$$

Следовательно, производительность сушильной камеры

$$\Phi = \frac{300}{\tau + \tau_1} \cdot \frac{0,85 K_{\text{ш}} T \Gamma}{25 + 1,08 T} = \frac{300}{\tau + \tau_1} K \Gamma. \quad (251)$$

Пример. Установить годовую производительность двухштабельной камеры с поперечной циркуляцией воздуха, загружаемой материалом с характеристикой условного ($T=50$ мм; $\tau=5$ сут и т. д.).

Габаритный объем двух штабелей $\Gamma = 2 \cdot 6,6 \cdot 1,8 \cdot 2,6 = 61,8 \text{ м}^3$. Отсюда производительность камеры

$$\Phi = \frac{300}{5,1} \cdot \frac{0,85 \cdot 0,9 \cdot 50 \cdot 61,8}{25 + 1,08 \cdot 50} = 59 \cdot 30 = 1700 \text{ м}^3 \text{ в год,}$$

где 59 — число оборотов камеры в течение года; 30 — вместимость камеры с условным материалом.

Расчет производительности сушильных туннелей аналогичен, но τ_1 принимают равным нулю.

81. УЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВНОМ МАТЕРИАЛЕ

Годовая производительность камер и туннелей

Для учета выполнения сушильным цехом производственной программы, сопоставления и оценки эффективности работы различных сушильных камер и туннелей, установления правильного задания на сушку и т. д. принимают постоянную единицу производительности $Y = 1 \text{ м}^3$ условного материала той же характеристики, что и для расчета продолжительности сушки.

Производительность камеры с перегретым паром на условном материале, когда $(\tau + \tau_1) = 0,41 \cdot 5 = 2,05$ сут, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$Y = nB = \frac{300}{2,05 + 0,1} \text{ КГ} = 139 \cdot 0,485 \text{ Г} = 68 \text{ Г}. \quad (252)$$

В камерах с реверсивной циркуляцией воздуха при его скорости по материалу более 2 м/с и повышенной тепломощности годовая производительность сушки условного материала, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$Y = [300 / (3,4 + 0,1)] 0,485 \text{ Г} = 41,5 \text{ Г}. \quad (253)$$

Производительность сушильных туннелей (СП-5КМ, «Валмет») с поперечной загрузкой штабелей с нормальным режимом сушки, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$Y = 0,485 \text{ Г} 300 / 4,0 = 36,4 \text{ Г}, \quad (254)$$

а при низкотемпературном режиме $Y = 18,2 \text{ Г}$.

Производительность туннелей с зигзагообразной циркуляцией (паровых), $\text{м}^3/\text{год}$:

$$Y = 0,485 \text{ Г} 300 / 5,0 = 29,1 \text{ Г}. \quad (255)$$

В газовых на 25% выше, т. е. $Y = 36,4 \text{ Г}$ (из-за неограниченной тепломощности).

В камерах обычной тепломощности с реверсивной поперечной циркуляцией, при скорости воздуха по материалу 1—2 м/с, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$Y = 0,485 \text{ Г} 300 / (5,0 + 0,1) = 28,5 \text{ Г}. \quad (256)$$

В сушильных *противоточных туннелях с продольной штабелевой* материала (ЦНИИМОД-24-27, «Оптимум» и др.) при сушке условного материала, м³/год:

$$Y = \frac{300}{5} \cdot \frac{0,85 \cdot 0,65 \cdot 0,50}{25 + 1,08 \cdot 50} \Gamma = 60,0 \cdot 0,35 \Gamma = 21,0 \Gamma. \quad (257)$$

Годовая производительность *паровых камер с рельсовой загрузкой штабелей и естественной циркуляцией воздуха* (также на условном материале), м³/год:

$$Y = 0,35 \Gamma 300 / (6,4 + 0,1) = 46,1 \cdot 0,35 \Gamma = 16,2 \Gamma. \quad (258)$$

В *боровных (огневых) камерах с естественной циркуляцией воздуха и с обычной рельсовой загрузкой штабелей* (с полезной их высотой, как и в предыдущих случаях, 2,6 м), м³/год:

$$Y = 0,35 \Gamma 300 / (7,7 + 0,1) = 13,4 \Gamma. \quad (259)$$

При *ручной укладке штабеля пиломатериалов в камере*, когда продолжительность загрузки и разгрузки примерно 2 сут, м³/год:

$$Y = 0,35 \Gamma 300 / (7,3 + 2,0) = 11,3 \Gamma. \quad (260)$$

Таким образом, *производительность сушильной камеры или туннеля в условном материале определяют по габаритному объему Γ всех штабелей, умноженному на постоянный коэффициент производительности Π* для данного типа сушильной установки. Этот коэффициент показывает удельную годовую производительность 1 м³ габаритного объема штабеля (м³/м³). При этом годовая производительность, отнесенная к одному штабелю или всей установке, будет соответственно, м³/год

$$Y = \Pi \Gamma. \quad (261)$$

Если продолжительность сушки большинства пиломатериалов более 5 сут, значение Π увеличивают пропорционально увеличению числа рабочих дней камер в году, т.е. в $335/300 = 1,12$ раза.

Возможность выразить производительность сушильной установки в условном материале Y через известный и постоянный для каждой камеры или туннеля габаритный объем Γ штабелей и также известную величину Π упрощает планирование работы сушильных цехов. Перемножив эти величины, получаем неизменную годовую производительность каждой камеры или сушильного цеха в условном материале (табл. 29).

29. Годовая производительность различных систем сушильных установок в условном материале (300 рабочих дней в году)

Характеристика сушильных установок	Удельная производительность габаритного штабеля Γ^* , м ³ /м ³	Число штабелей	Габаритный объем всех штабелей Γ , м ³	Производительность $У-\Gamma\Gamma$, м ³ /год
Камеры с перегретым паром	68,0/68	1	31	2 100
Камеры повышенной теплоемкости со скоростной циркуляцией	41,5/42	2	62	2 570
Туннели с зигзагообразной циркуляцией семиштабельные ($h=2,6$ м)	41,5/42	7	217	9 000
То же с полуторной высотой беспакетных штабелей ($h=3,9$ м)	41,5/42	7	325	13 500
То же ($h=5,2$ м)	41,5/42	7	434	18 000
Туннели типа СП-5КМ	36,5/37	10	357	13 200
Туннели типа СМ-4К	18,2 (экспорт)	12	816	15 000
Туннели пятиштабельные с зигзагообразной циркуляцией ($h=2,6$ м)	29,1/29	5	155	4 500
Камеры обычной теплоемкости с поперечной циркуляцией	28,5/29	2	62	1 770
Туннели противоточные с продольной штабелевкой материала	21,0/21	5	155	3 340
Камеры с естественной циркуляцией воздуха	16,2/16	2	62	1 000
Боровые камеры с рельсовой загрузкой материала	13,4/13	1	31	400

* В числителе — годовая, в знаменателе — округленно годовая.

Пересчет производительности в фактически высушиваемом материале на производительность в условном материале

Производительность Φ любой камеры при высушивании фактически имеющегося материала определяют по (251). Производительность в условном $У$ пиломатериале пропорциональна продолжительности сушки τ и обратно пропорциональна коэффициенту объемного заполнения штабеля материалом по его отношению к условному K_y . Тогда

$$Y = \Phi \frac{\tau K_y}{\tau_y K} = \Phi \frac{\tau 0,485}{5,0K} = 0,097 \Phi \frac{\tau}{K} \approx 0,1 \Phi \frac{\tau}{K}, \quad (262)$$

здесь τ — расчетная продолжительность сушки, сут.

Например, при высушивании 1000 м³ обрезных пиломатериалов толщиной 40 мм, просыхающих в течение $\tau=3$ сут и укладываемых в штабель без штапелей, когда $K=0,85 \cdot 0,9 \cdot 40 / (25+40 \cdot 1,08)=0,449$, объем сушки в условном материале $Y=0,097 \Phi \tau / K=0,097 \cdot 1000 \cdot 3 / 0,449=647$ м³.

Для более четкого представления о различии между количествами фактически высушиваемых пиломатериалов Φ и условных Y напишем последнюю формулу в виде

$$\Phi / Y = 10K / \tau \quad (263)$$

Отсюда видно, что на 1 м³ условных пиломатериалов Y нужно просушить тем больше фактических Φ , чем плотнее уложер

30. Количество Φ/Y фактически высушиваемых пиломатериалов на 1 м³ условных и коэффициент $K=Y/\Phi\tau$ для всех пород к формулам (262) и (249)

Толщина материала, мм	* Отношение Φ/Y для					Коэффициенты K^* в сушиль- ных установках с цирку- ляцией	
	ели, пихты	сосны, кедра, осины	березы, ольхи	бука, ясень, листвен- ницы	дуба, граба	естественной и противоточной	поперечной реверсивной
13	4,28	3,85	2,40	1,60	0,837	0,184/0,122	0,254/0,169
16	3,65	3,30	2,06	1,37	0,718	0,208/0,139	0,288/0,192
19	3,12	2,80	1,75	1,17	0,610	0,230/0,153	0,318/0,211
22	2,72	2,44	1,53	1,02	0,530	0,249/0,166	0,344/0,230
25	2,38	2,14	1,34	0,892	0,465	0,266/0,177	0,367/0,245
32	1,83	1,65	1,03	0,689	0,359	0,296/0,197	0,413/0,275
40	1,43	1,29	0,806	0,538	0,280	0,325/0,216	0,448/0,299
50	1,11	1,00	0,625	0,417	0,217	0,350/0,233	0,485/0,322
60	0,896	0,805	0,504	0,335	0,175	0,369/0,246	0,511/0,340
75	0,656	0,590	0,369	0,246	0,128	0,390/0,260	0,539/0,360
100	0,468	0,420	0,362	0,175	0,091	0,415/0,276	0,575/0,384
130	0,331	0,298	0,186	0,124	0,065	0,435/0,287	0,601/0,400
150	0,269	0,242	0,151	0,101	0,053	0,443/0,294	0,615/0,410

* В числителе — для обрезных пиломатериалов, в знаменателе — для необрезных.

Примечание. Квадратами выделены значения для условного материала.

материал в штабеле (больше K) и чем короче продолжительность сушки (так как τ в знаменателе). Это отношение (Φ/Y), а также значение K приведены для разных сортиментов в табл. 30.

На рис. 138 по формуле (263) построена диаграмма для быстрой оценки эквивалентности сушки различных сортиментов. Точка A показывает условный материал. Вертикали — линии эквивалентного высушивания 1 м^3 пиломатериалов (например, линия BC показывает эквивалентность высушивания 1 м^3 лиственничных досок толщиной 14 мм, или березовых 37 мм,

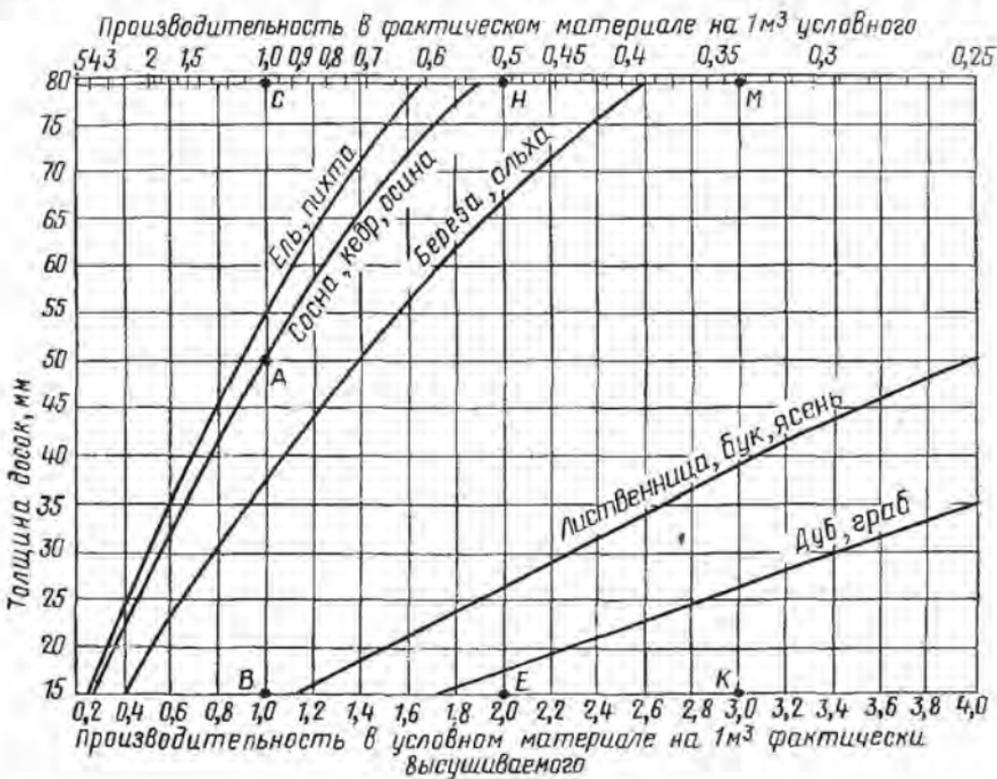


Рис. 138. Диаграмма для пересчета условной и фактической производительности при сушке пиломатериалов

или сосновых 50 мм, или еловых 55 мм; другие вертикали покажут аналогичные эквиваленты. Линию BC можно считать граничной между легко высушиваемыми (слева от нее) и трудно высушиваемыми сортиментами. Так материал по линии EH высушивать (по производительности) в 2 раза труднее, а по линии KM в 3 раза труднее (цифры 2 и 3 внизу), чем условный, т. е. сосновые доски толщиной 50 мм. Таким образом, возможен наглядный количественный анализ производительности камер при сушке разных сортиментов, а также сравнительная оценка их как объекта сушки.

82. ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА И ОСОБЕННОСТИ
АТМОСФЕРНОЙ СУШКИ

Параметры процесса атмосферной сушки пиломатериалов

Атмосферная сушка — это испарение влаги из материала под непосредственным воздействием наружного воздуха; при этом материал обычно защищают от атмосферных осадков временной сборной, съемной или постоянной инвентарной крышей.

Кроме сушки под непосредственным воздействием наружного воздуха материал можно высушивать в закрытых помещениях с регулируемым состоянием параметров воздуха посредством управляемого воздухообмена, в закрытых помещениях с водяным доувлажнением воздуха в летнее время, в специальных помещениях, улавливающих лучистую солнечную энергию, в установках с побудительной циркуляцией (механический вентилятор) и др.

Для испарения влаги используют природную теплоту относительно сухого наружного воздуха, т. е. без затраты тепла, продуцируемого из топлива или электроэнергии. Вследствие сравнительно невысокой температуры атмосферного воздуха процессы сушки протекают в начальной области Id -диаграммы.

Достаточно точно можно принять, что для адиабатного и установившегося во времени процесса испарения количество уносимой из штабеля влаги пропорционально количеству пропускаемого через штабель воздуха l_0 [см. (40)] и соответствующему понижению его температуры $t-t_2$ [см. (33)].

За потенциал сушки можно принять психрометрическую разность Δ_t , которая при постоянном коэффициенте теплоотдачи характеризует интенсивность испарения влаги с поверхности влажного материала, т. е. скорость сушки, поэтому ее следует считать основным параметром состояния воздуха и при атмосферной сушке.

Второй параметр — скорость движения воздуха по материалу. Большой скорости воздуха соответствует большее его количество, подводимое к материалу, и одновременно повышенный коэффициент теплоотдачи. Важность этого параметра обусловлена уменьшенной влагоемкостью воздуха и обычно меньшей его психрометрической разностью по сравнению с конвективно-тепловой сушкой.

Третий параметр — температура воздуха. Температура древесины, зависящая от температуры воздуха, предопределяет коэффициент влагопроводности по толщине материала, а также протекание биологических процессов, сопутствующих атмосферной сушке пиломатериалов.

Количество тепла Δ_i , используемого при атмосферной сушке из 1 кг поступающего к материалу воздуха [см. (41)], зависит от понижения его температуры $(t-t_2)$ в штабеле:

$$\Delta_i = \left(1,0 + 1,8 \frac{d}{1000}\right) (t - t_2) \text{ (кДж/кг)},$$

$$\left[\text{или } \Delta_i = \left(0,24 + 0,44 \frac{d}{1000}\right) (t - t_2) \text{ (ккал/кг)}. \right. \quad (264)$$

В случае неизменной температуры древесины процесс испарения свободной влаги изображается на Id -диаграмме отрезком по линии предела охлаждения, а связанной влаги — примерно по линии постоянной энтальпии (см. рис. 9). В расчетах атмосферной сушки можно принимать последний процесс. Рециркуляцию воздуха применяют только при высушивании материалов, которые могут растрескаться (например, заготовок обувных колодок), в хорошо герметизированных помещениях.

Особенности атмосферной сушки

Одна из особенностей атмосферной сушки — непостоянство состояния омывающего материал воздуха в зависимости от времени года, погоды и времени суток. Температура высушиваемого материала, соотношение между температурой воздуха и материала, а также скорость сушки все время изменяются, поэтому направление действительного процесса атмосферной сушки на Id -диаграмме отклоняется от установившихся процессов камерной сушки влажного материала.

На современном уровне развития атмосферной сушки пиломатериалов возникает необходимость учитывать и анализировать протекающие термодинамические процессы, в том числе с использованием Id -диаграммы.

Циркуляция воздуха в штабеле пиломатериалов, если нет ветра, в теплую погоду утром и днем, когда происходит нагревание и сушка материала, направлена сверху вниз, а вечером, когда прохладный воздух станет нагреваться еще теплым материалом, — снизу вверх. Чем влажнее и тоньше материал, тем интенсивнее будет происходить сушка, а следовательно, циркуляция воздуха. В штабеле сухих материалов во влажную погоду воздух будет отдавать материалу влагу, следовательно, нагреваться и подниматься кверху. По локальному естественному движению воздуха в штабеле можно судить о направлении и скорости процесса тепло- и массообмена.

Главная производственная особенность атмосферной сушки — ее сезонность. Зимний период неблагоприятен для атмосферной сушки. Лишь очень тонкие материалы заметно просыхают в зимнее время, отдавая путем сублимации замерзшую влагу. У пиломатериалов за зимний период влажность

понижается в слое на глубину 1—3 мм от поверхности, что заметно по более светлому оттенку подсохшей древесины.

Скорость атмосферной сушки регулируют количеством подводимого к материалу воздуха и частично местом расположения материала на территории склада и в штабеле. Процесс протекает при невысоких температурах древесины, когда продвижение влаги в ней и упруго-пластические деформации замедленны. Скорость испарения влаги в этих условиях значительно понижается, возможность же возникновения напряжений и растрескивания материала не меньшая, чем при конвективно-тепловой сушке; однако раковины (внутренние трещины) из-за меньших остаточных деформаций не образуются.

Конечная влажность древесины зависит от равновесного состояния воздуха. Как правило, древесина атмосферной сушки достигает в северной и средней климатических зонах СССР транспортной влажности около 16—20%, а на юге — 12—15%. Без досушивания в камерах она непригодна для изготовления изделий, используемых затем внутри отапливаемых помещений.

Во время замедленной атмосферной сушки древесина поражается плесенью, синевой и гнилями. Ввиду значительной опасности посинения сосновые пиломатериалы лучше не выпиливать в летнее время, если они не могут быть немедленно антисептированы. При форсированной сушке толстые сортаменты (тем более твердых лиственных пород) растрескиваются. Для качественного атмосферного досушивания древесины необходимо создать такие условия, при которых исключалась бы как возможность грибных поражений (из-за медленной сушки), так и растрескивание пиломатериалов (при быстрой сушке).

Крупные сортаменты (особенно твердых пород), атмосферная сушка которых без растрескивания затруднительна, немедленно после распиловки надо укладывать в достаточно герметизированные помещения или загружать в сушильные камеры, где процесс сушки хорошо регулируется.

Роль атмосферной сушки по сравнению с конвективно-тепловой возрастает с уменьшением толщины досок, а также с понижением их сортности. Все пиломатериалы, не проходящие конвективно-тепловую сушку, должны подвергаться атмосферной сушке на месте их выпилки.

Любые влажные пиломатериалы, находящиеся в летнее время на заводах, стройках и т. д., должны быть уложены в штабеля таким образом, чтобы их атмосферная сушка могла активно протекать не позже как со следующего дня после их выпилки или доставки, а в зимнее время — в течение 3 дней.

При неправильном ориентировании на стихийную или попутную (при транспортировке) сушку взамен штабеля, технически организованной, пиломатериалы портятся — появляется резко различная влажность даже в пределах одной доски, что резко снижает качество древесины.

Планировка склада

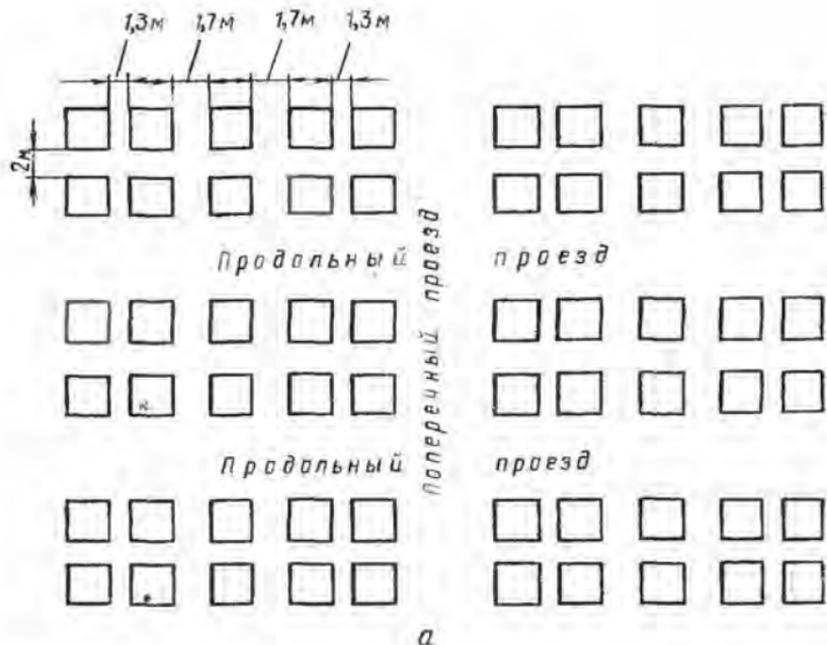
При проектировании склада (биржи) пиломатериалов учитывают климатические условия, рельеф местности, направление ветров и минимальные расходы по транспортировке пиломатериалов.

Для этой цели отводится специально оборудованная и обслуживаемая территория. Склад должен находиться не ближе 100 м от котельной предприятия. При устройстве и эксплуатации склада пиломатериалов должны быть обеспечены пожарная безопасность и наилучшие условия просыхания по возможности всех находящихся на нем пиломатериалов, а также созданы благоприятные условия для ведения погрузочных, перекладочных и отгрузочных работ с потребной их механизацией. Основные производственные единицы склада — штабеля; из них группируют секции, состоящие из двух рядов штабелей.

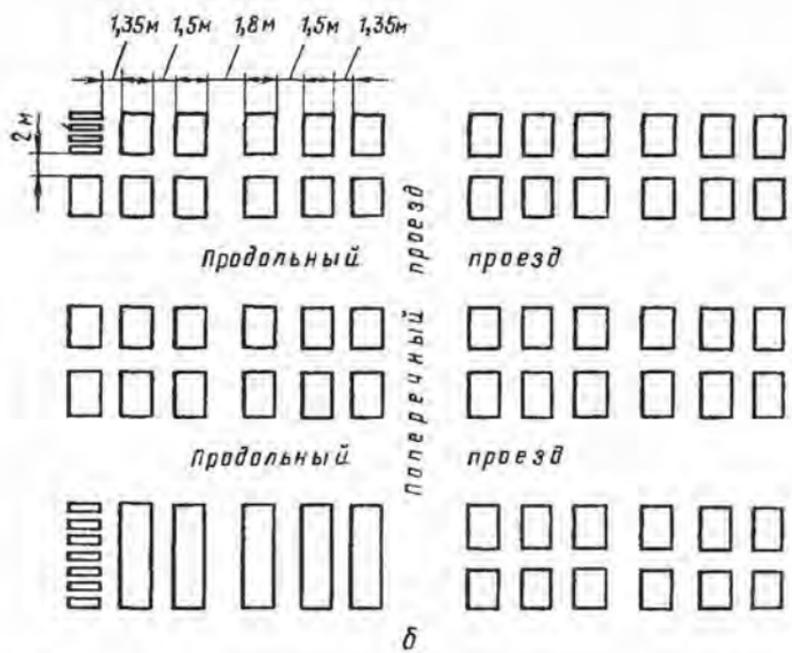
Проезды, идущие по длинной стороне секции, называются продольными, а перпендикулярные им — поперечными. Транспорт обычно движется по поперечным проездам и в каждом проезде только в одном направлении. Укладка и разборка штабелей выполняется со стороны продольных проездов. Проезды — прямые и одинаковой ширины. Для движения воздуха между штабелями устраивают разрывы, увеличивающиеся к середине секции.

На рис. 139 и 140 приведены по ГОСТ 3808.1—75 примеры планировки складов различной вместимости с разной оснащённостью их погрузочной техникой. На рис. 139, а показана планировка группы рядовых штабелей со штучной укладкой пиломатериалов, на рис. 139, б — планировка при пакетной транспортировке и формировании штабеля автопогрузчиком, когда пакет выкладывают на сортировочной площадке лесопильного цеха, доставляют автопогрузчиком к штабелю и укладывают в него. На рис. 140, а дана планировка при доставке пакетов от сортировочной автолесовозом и укладке их в штабель башенным краном, а на рис. 140, б — также при доставке автолесовозом и укладке пакетов в штабель козловым краном. Все штабельные места нумеруют, как и дороги (продольные — четными номерами, а поперечные — нечетными). Если площадь склада более 4,5 га, ее разделяют противопожарными разрывами шириной не менее 25 м.

Склад обычно проектируют удлиненным вдоль отгрузочного фронта — железной дороги или водного причала, так, чтобы транспортные пути для перевозки пилопродукции были минимальными. Территория склада должна быть с небольшим уклоном и без углублений, чтобы атмосферные осадки стекали сво-



а



б

Рис. 139. Схемы планирования складов пиломатериалов на небольших производствах:

а — при штучной укладке досок; б — при пакетной укладке автопогрузчиком

бодно. При необходимости проводится дренаж. Не допускается засыпка низких мест отходами лесопиления, которые гниют, оседают и, кроме того, служат источником грибной инфекции.

Для свободного движения воздуха продольные проезды желательно проектировать по направлению господствующих ветров, а при слабой их выраженности — с севера на юг. Территория склада должна быть открыта со всех сторон и расположена, если это возможно, на возвышенном месте. Деревья и кустарники выкорчевывают. Ширина прямых проездов делается 9—12 м, а промежутки между штабелями в среднем 1,5 м по направлению продольного и 2 м по направлению поперечного проезда. Однако на юге СССР при атмосферной сушке растрескивающихся пиломатериалов твердых лиственных пород склады устраивают по возможности защищенными от сильных потоков воздуха.

Для лучшего движения воздуха межштабельные промежутки следует располагать по прямой линии, чтобы они образовали общие проходы для воздуха через весь склад пиломатериалов.

Климатические зоны СССР

Применительно к сушке древесины территория СССР условно разделена на четыре климатические зоны [56]:

1-я зона, северная: Архангельская, Мурманская, Вологодская, Кировская, Пермская, Свердловская, Сахалинская, Камчатская и Магаданская области, северная половина Западной и Восточной Сибири, Коми АССР;

2-я зона, северо-западная: Карельская АССР, Ленинградская, Новгородская и Псковская области;

3-я зона: средняя (по широте) часть СССР;

4-я зона: южная по широте часть СССР, в том числе УССР, Молдавская ССР, Курская, Астраханская, Куйбышевская, Саратовская, Волгоградская, Оренбургская, Воронежская, Тамбовская, Пензенская, Ростовская, Ульяновская области, Кавказ и Закавказье.

В зависимости от климатических условий материал просыхает с различной скоростью: замедленно на севере, где главной опасностью является биологическая порча материала (в первую очередь тонкого) — посинение, загнивание, и интенсивно на юге, где главная опасность, в основном для толстых материалов, появление трещин.

В соответствии с этим применяют различные технологические приемы для предупреждения указанных дефектов и получения максимальной производственной эффективности при сушке пиломатериалов.

На каждом складе, внутри каждого штабеля и даже вокруг отдельной влажной доски возникает микроклимат. Чем больше испаряется влаги из древесины на каждой единице площади склада и медленнее отводится влага (слабее аэрация), тем резче изменяются местные метеорологические условия, создавая переменный местный микроклимат. Именно поэтому толстые пиломатериалы, легко растрескивающиеся, нуждающиеся в замедленной сушке, укладывают в середине и ближе к подветренной стороне склада с повышенным коэффициентом заполнения штабеля [см. (249)], а тонкие пиломатериалы хвойных пород и, тем более, поражаемые синевой (сосновые и кедровые) — с наветренной стороны склада (со стороны господствующих ветров).

Чем крупнее штабель, чем легче материал отдает влагу (тонких, мягких пород) и чем меньшее количество воздуха поступает в штабель, тем резче выражен микроклимат внутри штабеля.

Сильно увлажненным воздух становится внутри штабеля при завышенной плотности размещения материала и несоблюдении правил укладки досок. В этом случае поступление воздуха почти приостанавливается и процесс сушки древесины внутри штабеля может практически прекратиться, в то время как древесина на его периферии, особенно если доски тонкие, быстро обезвоживается (концы досок, верхние и боковые в штабеле). При этом усредненный процесс сушки пиломатериалов всего штабеля резко замедляется и древесина поражается грибами.

При изменении внешних температурных условий штабелю пиломатериалов свойственна значительная тепловая инерция. В условиях повышения температуры воздуха (в первую половину дня) внутри штабеля наблюдается еще пониженная температура, а при резком снижении температуры внешнего воздуха температура в штабеле некоторое время сохраняется повышенной. В штабеле инерционно выравнивается ход суточной температуры воздуха, особенно в штабеле с влажными тонкими пиломатериалами. Амплитуда суточных колебаний температуры воздуха внутри штабеля наблюдается в 1,5—2 раза меньше, чем на открытом воздухе [54].

Явления микроклимата следует учитывать как при планировке склада пиломатериалов, размещении на нем различных сортиментов, так и особенно при определении способа укладки пиломатериалов. Тонкие доски укладывают в месте наиболее интенсивной сушки, с наветренной стороны склада, а средней толщины — с подветренной, толстые доски размещают в центральной части территории склада, несколько приближая к подветренной его стороне.

По данным работы [54] повышение температуры воздуха на складе можно получить за счет применения зачерненных поверхностей. Крыши штабелей, изготовленные из потемневших досок прежней распиловки, поглощают больше солнечного излучения, чем из досок свежей распиловки. Однако даже свежестроганые доски обладают высокой степенью черноты — коэффициент поглощения около 0,80—0,90 [65], т. е. значение альбедо (степень отражения в %) составляет 20—10.

84. КОНСТРУКЦИИ ШТАБЕЛЕЙ И СПОСОБЫ УКЛАДКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ХВОЙНЫХ ПОРОД

Основные конструкции штабелей

Размеры штабеля в плане зависят от длины и способа укладки предназначенных к сушке пиломатериалов. Площадь штабеля для досок принимают обычно 6,6×6,6 м. Высота штабеля определяется условиями погрузки пиломатериалов; мелкие заготовки укладывают на высоту 2—3 м, крупные — на

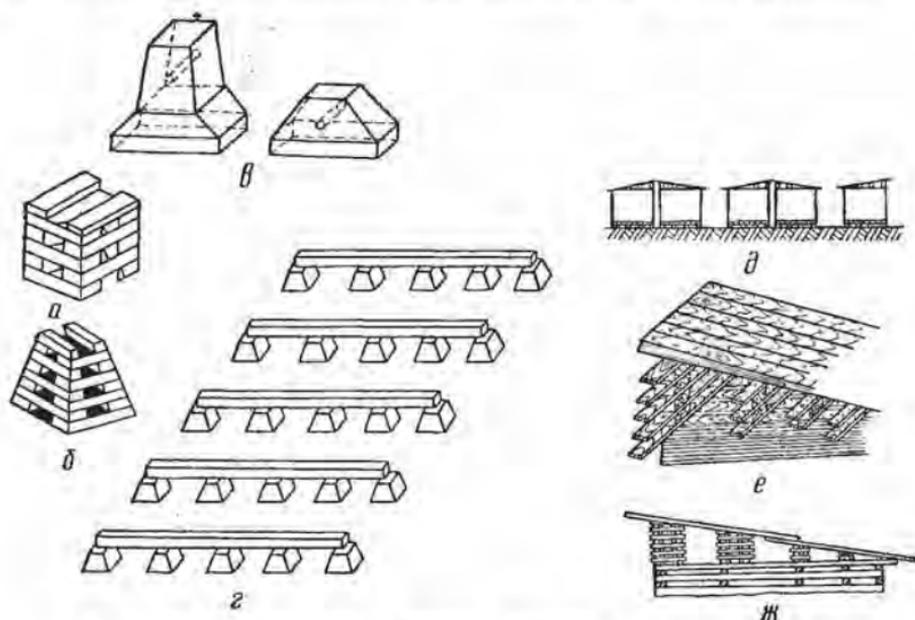


Рис. 141. Фундамент и крыши штабелей пиломатериалов:

а, б — клеточные фундаментные опоры; в — бетонные опоры; г — подштабельное основание; д — направление уклонов крыши; е, ж — устройство разборной крыши

3—5 м, доски при ручной укладке — до высоты 6 м, а при механизированной — в зависимости от механизма, но не выше 12 м для толстых пиломатериалов; при более высоких штабелях сминаются как прокладки, так и пиломатериалы между ними, в нижней части штабеля.

Для того чтобы из-под штабеля беспрепятственно удалялся влажный воздух и нижняя часть его свободно продувалась ветром, материал укладывают на переносные фундаментные опоры из консервированных отрезков толстых досок (рис. 141, а, б) или лучше бетонные (рис. 141, в), высотой 500 мм. Во влажных местах и при высоком снежном покрове (более 500 мм) высоту опор увеличивают до 750 мм, а при наличии водоотводов, асфальтобетонных покрытий подштабельных мест и малом снежном покрове (до 250 мм) — снижают до 300 мм. Шаг опор для пиломатериалов хвойных пород на севере до 1600, а на юге до 1300 мм. Опоры соединяют прогонами (рис. 141, г). Верх всех прогонов должен быть в одной плоскости. На глинистых пучащихся грунтах применяют деревянные консервированные сваи.

Крыша над штабелем свисает за края в промежутки между штабелями (рис. 141, д) на 250—600 мм, с учетом косых дождей. Покрытие устраивают из двух уложенных внахлестку рядов тонких (22—25 мм) досок шириной не менее 150 мм, без сквозных трещин и выпадающих сучков. Доски крыши кладут вверх наружной пластью, учитывая их последующее коробление и образование желоба на верхней стороне для стекания воды. Крыши могут быть разборными, с уклоном 12%, на подголовниках (рис. 141, е, ж), которые должны быть расположены над опорами фундамента, и готовые (инвентарные) крыши с уклоном 6%. Готовые крыши поднимают при окончании укладки штабеля или при временной остановке погрузочных работ.

Закономерности размещения досок в штабеле

Во время атмосферной сушки возникает опасность поражения древесины грибами или растрескивания пиломатериалов. Грибы развиваются в теплое время года при степени насыщенности пара ϕ в воздухе более 0,8, что создается в условиях слабой циркуляции воздуха в штабеле из-за малого размера шпаций (промежутков) между кромками досок и несоблюдения вертикальности шпаций. Если же шпации слишком большие, снижается количество уложенных в штабель досок, при этом толстые доски в сухом воздухе будут растрескиваться. Поэтому пиломатериалы надо укладывать так, чтобы внутри штабеля создавались оптимальные микроклиматические условия.

Существуют также специальные способы регулирования воздухообмена штабеля путем закрывания его с боков досками или щитами; применяют экраны, усиливающие поток воздуха, в том числе направление высокой стороны крыши в проезд, навстречу господствующим ветрам, изменяют высоту фундамента и самого штабеля, укладывают толстые пиломатериалы в помещениях с регулируемым воздухообменом и др.

При сухой и ветреной погоде или при сушке толстого материала, медленно отдающего влагу, воздухообмен штабеля необходимо уменьшить, более плотно уложив материал. Наоборот, в осеннее время года или во влажном климате и особенно при высушивании тонких досок, легко отдающих влагу, материал укладывают разрыхленно. Тонкий или очень влажный материал в крупных штабелях укладывают рыхлее, чем толстый, подсушенный или в меньших по размеру штабелях.

В боковых частях штабелей, освободнее омываемых воздухом, материал следует укладывать плотнее. Размеры штабеля желательно выбирать небольшие для быстро просыхающих материалов; для толстых сортиментов должны быть созданы более влажные микроклиматические условия, что достигается, в частности, увеличением размеров штабеля.

История развития, современные проблемы, содержание и технология атмосферной сушки пиломатериалов изложены в работе [54]; организация, технология и техника регламентированы ГОСТ 3808.1—75 (хвойные породы) и ГОСТ 7319—74 (лиственные породы).

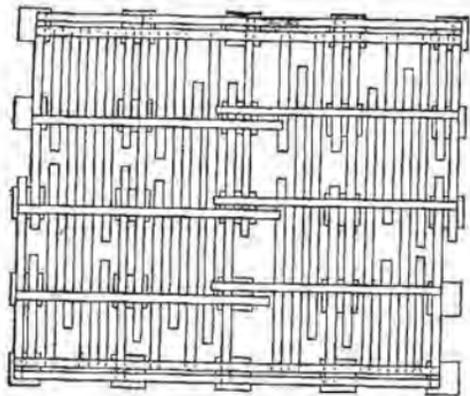
* Способы укладки досок в штабеля

Короткие пиломатериалы кладут по длине со стыковкой так, чтобы внешние их торцы были выровнены. Необрезные пиломатериалы укладывают комлевыми концами в разные стороны, с образованием трубы шириной 120—150 мм в середине штабеля или пакета, при этом узкие доски размещают внутри, а широкие по краям штабеля или пакета.

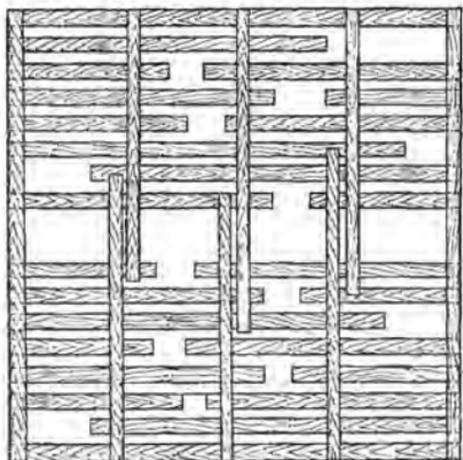
В рядовые штабеля укладывают пиломатериалы шириной до 150 мм, а также более широкие низкосортные. Для предохранения торцов от растрескивания их затевают дополнительной доской, применяя метод укладки в виде глубокого потая (рис. 142, а). В противоположность затенению торцов допускается укладка досок, отгружаемых в текущем сезоне, с высушенными на 400—450 мм концами; однако при этом, возможно, будет происходить коробление свободных концов, особенно при пониженной влажности (в южных районах).

Для лучшей вентиляции воздуха в рядовых штабелях устраивают каналы: вертикальный шириной не менее 400 мм (рис. 142, а) и два горизонтальных (на стульчиках) на высоте 1 и 2,15 м от нижнего ряда досок; высота стульчиков не менее 150 мм.

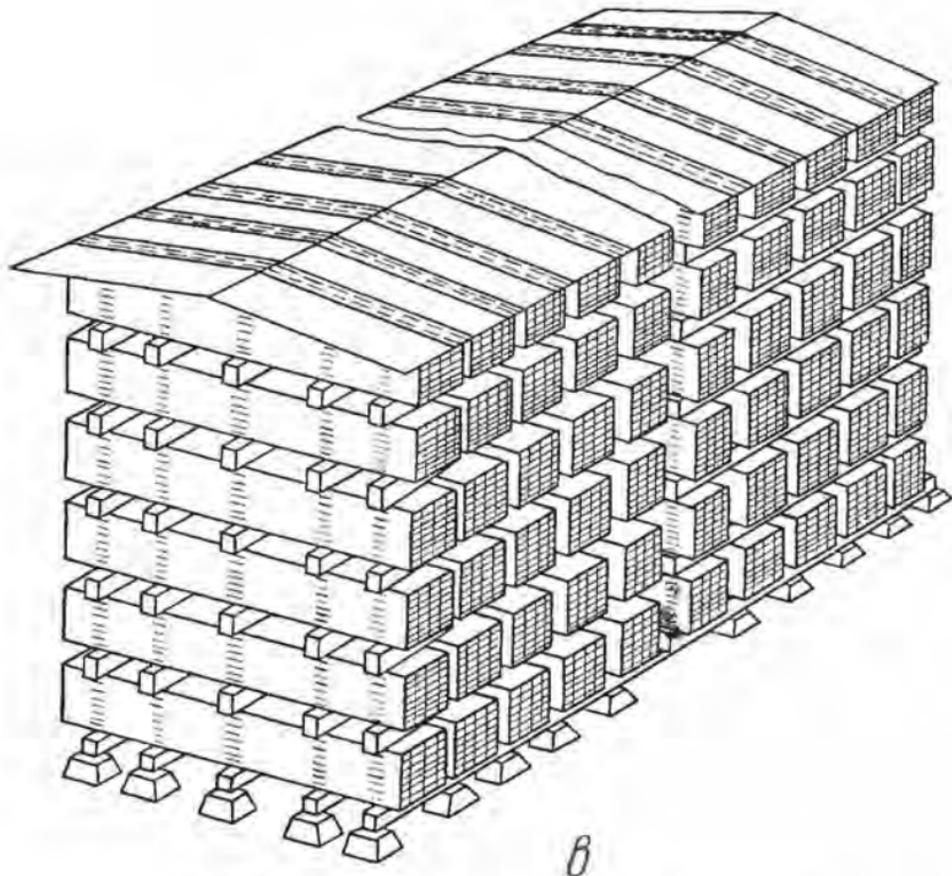
Для материалов шириной 160—280 мм ширина шпаций соответственно 125—150 и 150—175 мм. Полезно шпации в середине штабеля делать шире, чем у боков. Сечение прокладок 25×40 мм, а при укладке высоких штабелей—25×50 мм (ГОСТ 22211—75). Расстояние между прокладками (прогонами фундамента) должно быть равным 40—50-кратной толщине



a



b



в

Рис. 142. Формирование штабелей пиломатериалов:

a — рядовой штабель (укладка досок впотай); *б* — рядовой штабель (укладка досок торцами заподлицо с прокладкой); *в* — пакетный штабель

досок. В южных районах, где древесина просыхает до более низкой влажности и поэтому больше коробится, это расстояние уменьшают.

Во избежание застоя воды на покоробленных досках и уменьшения их растрескивания от воздействия солнечных лучей толстые доски кладут наружной пластью вниз.

При укладке пиломатериалов в пакеты ширина шпаций должна быть не менее 50 мм для сосновых и кедровых и не менее 35 мм для остальных пиломатериалов. Для антисептированных пиломатериалов ширина шпаций может быть уменьшена до 25 мм. Если предусматривают последующую сушку, пиломатериалы для атмосферной сушки укладывают в пакеты без шпаций.

Пакеты связывают между собой межпакетными прокладками — брусками сечением не менее 100×100 мм. Общий вид штабеля из пакетов показан на рис. 142, в. Разрывы между смежными пакетами должны быть не менее 250 мм при высоте штабеля до 6 м и не менее 400 мм, если штабель выше 6 м. Разрывы желательно делать более широкими к середине штабеля.

85. ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ТВЕРДОЛИСТВЕННЫХ ПОРОД

К особенностям атмосферной сушки пиломатериалов твердолиственных пород относятся: 1) бóльшая, чем для материалов хвойных пород, опасность растрескивания и коробления; 2) жесткие метеорологические условия процесса сушки, поскольку твердые лиственные породы произрастают в основном на юге СССР, но нуждаются в более мягких (северных) режимных условиях сушки; 3) выработка этих пиломатериалов в сравнительно небольших количествах, когда приходится укладывать не крупные штабеля со слабо выраженным внутренним микроклиматом.

Наиболее быстро растрескиваются при сушке дубовые пиломатериалы; в летнее время у выпиленных заготовок, уложенных в открытые штабеля, уже на следующий день могут возникнуть торцовые трещины, которые затем распространяются на внешнюю пласт. Чем крупнее сортимент, тем больше опасность его растрескивания.

Для уменьшения торцового растрескивания штабеля сдвигают по длине так, чтобы их торцы плотно соприкасались. Вместо прокладок на концах штабелей укладывают дощечки мягких пород одинаковой толщины с прокладками, выпуская их на половину ширины за пределы штабеля для затенения торцов уложенных пиломатериалов. Кроме того, торцы толстых досок покрывают нагретыми битумными, смоляными или пара-

финовыми замазками. Доски всех твердых пород следует класть в штабель наружной пластью вниз.

При укладке брусков по краям штабеля отбирают бруски полурадиальной и радиальной распиловки, а в середину — легко растрескивающиеся тангентальной распиловки. У бруска тангентальной распиловки растрескивающуюся наружную (по отношению к сердцевине) пласть прикрывают таким же смежно лежащим бруском. У толстых досок радиальной распиловки таким же способом защищают кромки, чтобы предотвратить их растрескивание. Для уменьшения воздухообмена небольшие штабеля укладывают совсем без шпаций на боковых третях штабеля или с малыми шпациями (ГОСТ 7319—74). Особо тщательно укладывают пиломатериалы из граба и клена.

Для снижения опасности растрескивания пиломатериалов из дуба, граба и клена штабеля закрывают с боков щитами, или размещают в герметизированных закрытых помещениях, вентиляция которых регулируется по показаниям психрометра, находящегося между штабелями. Предприятия должны накапливать опыт и совершенствовать методы и технику сушки различных сортиментов в специфических местных условиях.

Заготовки I сорта твердых пород высушивают в 4-й климатической зоне в закрытых помещениях с регулируемым воздухообменом, а в 3-й зоне — в помещениях с открытой северной стороной. Заготовки II и III сортов твердых пород сушат под навесами (крыша на столбах).

Березовая и буковая древесина во влажном и теплом состоянии быстро разрушается грибами, поэтому ее следует высушивать как можно быстрее. Для пиломатериалов этих пород характерна значительная продольная, а у буковой породы также поперечная покоробленность, которая может быть предотвращена тщательной их укладкой при более частом расположении прокладок.

Покоробленность квадратных брусков уменьшится, если у всех брусков в ряду годовые слои ориентировать в одном направлении. Все бруски ряда в этом случае усохнут одинаково по высоте и, следовательно, будут хорошо зажаты во время сушки.

Для достижения более равномерного конечного просыхания крупные ценные заготовки в процессе атмосферной сушки перекаладывают так, чтобы верхняя часть штабеля была затем внизу, а боковые заготовки внутри его.

86. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ АТМОСФЕРНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ И СПОСОБЫ ЕЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ

Влажность пиломатериалов устанавливают на складе периодическим взвешиванием контрольных отрезков или целых досок, закладываемых в нижнюю часть штабеля (на $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{5}$ его высоты).

При использовании в качестве прокладок укладываемых досок влажность древесины можно определять по величине усадки штабеля. Для этого длинную рейку верхним концом жестко прикрепляют к доске штабеля так, чтобы ее нижний конец был на уровне глаз наблюдателя и мог свободно опускаться, скользя по короткой линейке с делениями, прикрепленной к штабелю против нижнего конца рейки. Величину усадки штабеля записывают 1—2 раза в неделю. При этом учи-

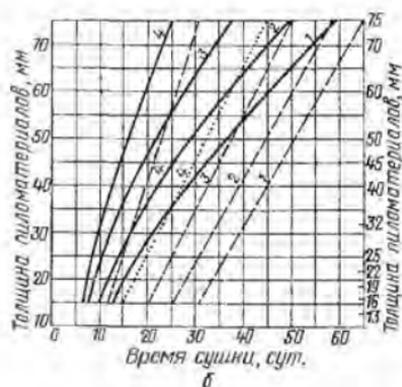
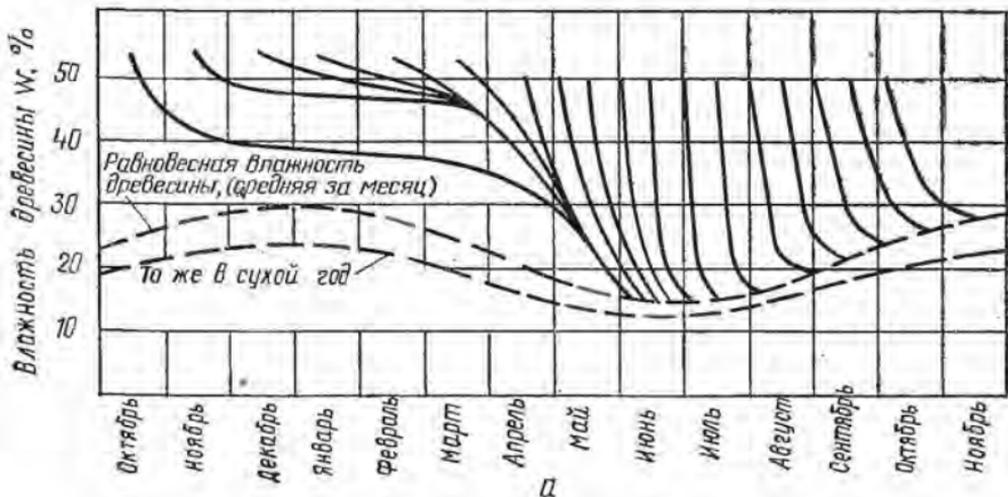


Рис. 143. Диаграммы продолжительности атмосферной сушки хвойных пиломатериалов:

а — в г. Ленинграде в течение года; б — в различных климатических зонах СССР

тывают также состояние погоды. Для каждого высушиваемого сорта опитным путем выявляют величину и, желателно, график усадки, показывающие момент завершения сушки материала. Окончательную влажность высушенной древесины определяют по ГОСТ 16588—71. Кинетика сушки сосновых досок толщиной 25 мм в г. Ленинграде в течение года дана на рис. 143, а. Такие кривые ценны для планирования сушки досок.

Примерная продолжительность сушки сосновых и кедровых пиломатериалов различной толщины и в разных климатических

зонах показана графически на рис. 143, б; сушка в июне и июле показана сплошными линиями, в апреле, мае, августе и сентябре — пунктирными, а в марте и октябре в четвертой климатической зоне — точками; климатические зоны обозначены цифрами. Еловые и пихтовые пиломатериалы просыхают на 10—20% быстрее, а лиственничные на 60% медленнее. Вследствие многообразия местных условий, а также в зависимости от погоды фактическая продолжительность сушки может отклоняться от показанной на рис. 143, б.

В весеннее и осеннее время процессы отдачи влаги материалом относительно замедленные, поэтому продолжительность сушки τ пропорциональна толщине материала T :

$$\tau = bT, \quad (265)$$

где b — коэффициент равный 1,2; 1,0; 0,8 и 0,5 (τ в сутках) для климатических зон соответственно 1, 2, 3 и 4.

Для летнего времени, с более интенсивной сушкой, показатель степени при T равен 1,1 [в камерах в среднем 1,5, см. (180)]:

$$\tau = bT^{1,1} \quad (266)$$

со значениями b соответственно 0,7; 0,6; 0,45 и 0,35.

Продолжительность сушки (в сутках) дубовых досок в южных районах СССР в летнее время примерно соответствует их толщине в миллиметрах, т.е. материал толщиной 25—32 мм просыхает в течение месяца.

Конечная влажность древесины атмосферной сушки должна быть не более 22%. Можно допустить повышенную влажность, прекратив атмосферную сушку, если материал (желательно уложенный пакетами) подают в сушильные камеры для окончательного высушивания до требуемой более низкой влажности. Такой метод комбинированной сушки способствует получению материала с малыми упругими деформациями и перепадами влажности по объему штабеля и толщине материала, т.е. с улучшенными качественными показателями.

Сухие пиломатериалы хранят только в плотных, хорошо закрытых сверху и с боков пакетах. При их укладке применяют минимальное количество прокладок, необходимое лишь для сохранения устойчивости пакета. Качественные, а также строганные сухие пиломатериалы должны храниться в закрытых помещениях или под навесами с учетом требований ГОСТ 16369—70 и ГОСТ 19041—73.

Ускорение сушки путем разрыхленной укладки штабеля

На небольших предприятиях, стройках и т.п. часто бывает необходима быстрая атмосферная просушка древесины в теплое время года. Основной прием ее интенсификации — повыше-

ные скорости движения воздуха по материалу, когда увеличивается коэффициент испарения влаги из древесины и одновременно улучшаются микроклиматические условия с возрастанием среднего потенциала сушки в штабеле. Для этого материал укладывают в рядовые штабеля более разрыхленно. Для узкого материала примерно удваивают ширину шпаций, а для широкого, кроме того, применяют более толстые прокладки. Уменьшение ширины и высоты штабеля, увеличение высоты подштабельного пространства до 750 мм и точное соблюдение вертикальности шпаций также способствуют более свободному продуванию его воздухом.

Не следует использовать рекомендовавшийся ранее способ скоростной сушки досок, установленных в козлы в виде вертикальных ножиц. Такие доски высохнут покоробленными, кроме того, нижние концы их будут более влажные, чем верхние.

Наклонная укладка досок в штабеля

Широкие доски можно укладывать в наклонные штабеля в боковом направлении (уклон около 5—8%), как это показано на рис. 144, а (см. также рис. 78, б). Однако все стенки

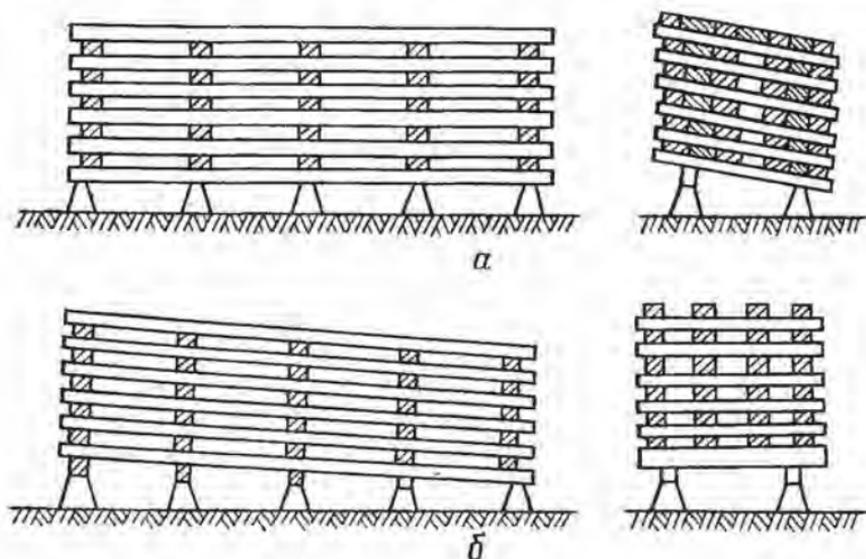


Рис. 144. Штабеля с наклонной укладкой пиломатериалов:

а — наклон по ширине досок; б — наклон по длине досок

штабеля должны быть вертикальными, а основание — строго плоскостным, наклонным. Такой штабель не нуждается в крыше. Достаточно сплотить два верхних ряда досок, уложив их без прокладок, и навесить их по длине и ширине за пределы

штабеля. Дождевая вода, попавшая внутрь штабеля, будет быстро стекать, не проникая в толщу досок.

Возможна укладка досок наклонно по длине (рис. 144, б). В этом случае также отпадает необходимость в специальной крыше, а циркуляция воздуха внутри штабеля и, следовательно, процесс сушки древесины ускоряется.

Побудительная атмосферная сушка

Этот способ сушки обозначает высушивание пиломатериалов в атмосферных условиях с применением побудительной циркуляции воздуха. На рис. 145 изображены установки для атмосферной сушки пиломатериалов хвойных пород небольшой толщины, с побудительной циркуляцией воздуха, со скоростью 3—4 м/с (ЦНИИМОД).

По данным работы [58], продолжительность побудительной атмосферной сушки в 2—3 раза короче, чем без побуждения, и для пиломатериалов толщиной 38 мм в летнее время равна примерно 8—10 сут. При толщине материала 25 мм продолжительность сушки в первой климатической зоне (г. Архангельск) следующая, сут: в октябре 15, в апреле 13, в мае и в сентябре 10 и в июле 6,6. Побуждение циркуляций воздуха эффективно при $\phi < 0,9$ и $t > 5^\circ\text{C}$. Летом вентиляторы не выключают и в дождливую погоду. Для уменьшения бесполезной утечки воздуха штабеля по периметру тщательно экранируют. Стоимость электроэнергии около 50 коп. на 1 м³ древесины, что вместе с дополнительными расходами удорожает такую сушку по сравнению с обычной атмосферной в пакетах примерно на $\frac{1}{3}$ (с 1 р. 72 к. до 2 р. 35 к. за 1 м³).

Качество пиломатериалов такой сушки выше, чем обычной атмосферной, так как древесина не поражается синевой и уменьшается растрескивание торцов. Достигается высокая равномерность просыхания древесины; при конечной влажности 20% величина среднеквадратического отклонения $\sigma \pm 2,0$. Не требуется антисептирования пиломатериалов. Период работы установки в условиях г. Архангельска апрель—октябрь.

Побудительная атмосферная сушка эффективнее для тонких пиломатериалов, а также в южной климатической зоне с более продолжительным теплым временем года. Чем тоньше материал, тем выше должна быть скорость воздуха и короче путь его движения по материалу.

Для удлинения периода отгрузки сухих пиломатериалов на предприятиях, не имеющих сушильных камер или туннелей, в установках, аналогичных показанной на рис. 145, можно подогревать воздух. Однако в этом случае сушка пиломатериалов будет с однократной циркуляцией воздуха. Такого рода сушильные установки перспективны для промышленности, но пока не найдено их рациональное техническое решение.

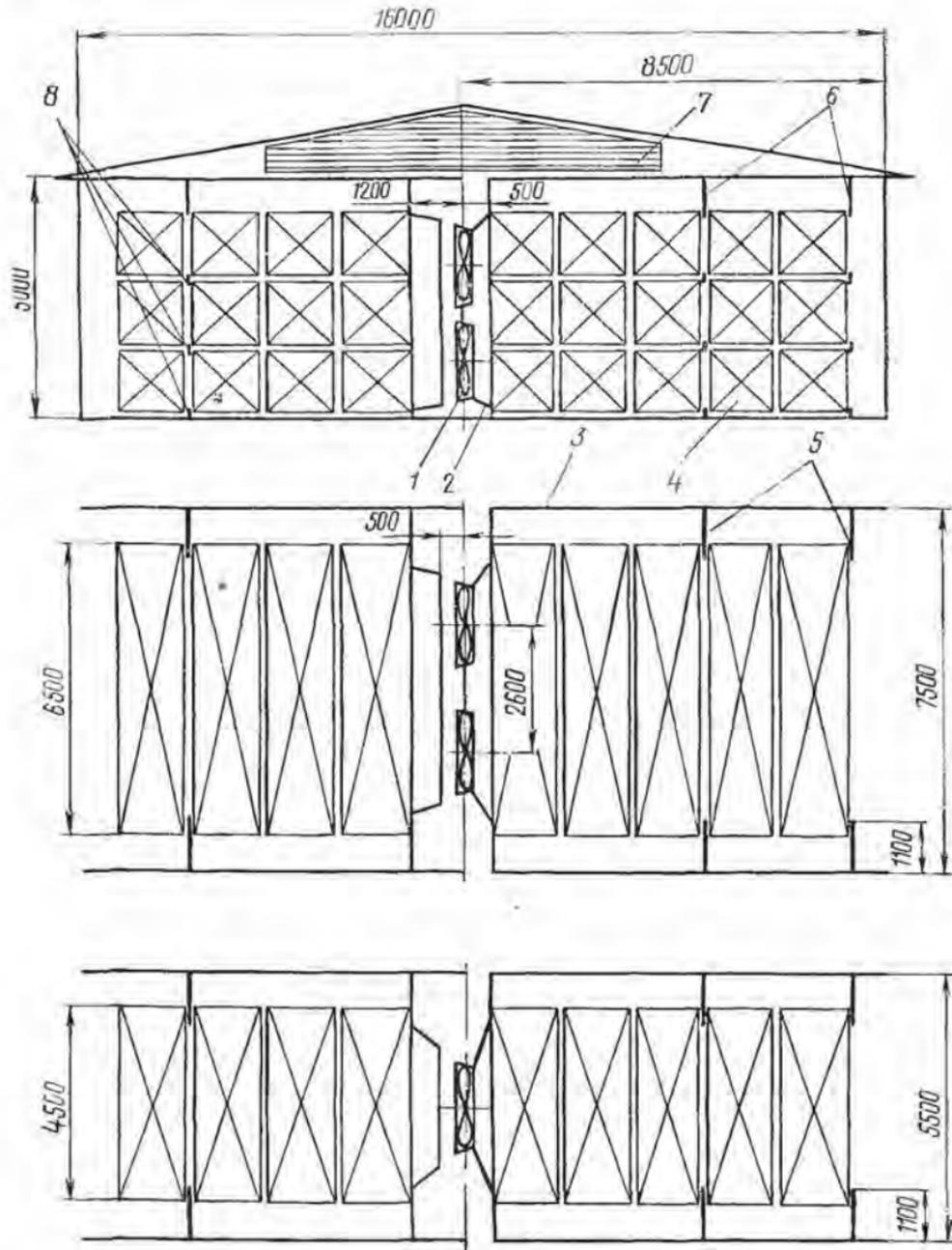


Рис. 145. Установка для побудительной атмосферной сушки пиломатериалов:
 1 — осевой вентилятор; 2 — коллектор вентилятора; 3 — ограждения туннеля; 4 — пакет пиломатериалов; 5 — торцовые экраны; 6 — потолочные экраны; 7 — жалюзийная решетка; 8 — экраны межпакетные

Площадь склада

Для приближенного расчета необходимой площади F склада следует установить требуемую его вместимость, т. е. количество B размещаемых на нем пиломатериалов, среднюю полезную высоту штабелей H , коэффициент использования уложенными штабелями $K_{ш}$ общей площади склада (0,3 . . . 0,35), коэффициент K заполнения штабеля материалом [см. (249)] $K = 0,2 \dots 0,3$ (см. табл. 31). С учетом этих параметров площадь склада равна [57]:

$$F = B / (HK_{ш}K). \quad (267)$$

Так, в случае $B = 10\,000 \text{ м}^3$, $H = 6 \text{ м}$, $K_{ш} = 0,35$ и $K = 0,20$ получим $F = 10\,000 / (6 \cdot 0,35 \cdot 0,2) = 23\,800 \text{ м}^2$.

Ориентировочно можно принимать, что в зависимости от толщины материала и высоты штабелей на 1 м^2 площади склада приходится 0,3—0,6 м^3 уложенных пиломатериалов на крупных складах и 0,2—0,4 на небольших.

87. АНТИСЕПТИРОВАНИЕ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ И САНИТАРНОЕ СОДЕРЖАНИЕ СКЛАДА

Антисептирование пиломатериалов

При замедленной атмосферной сушке в теплое время года на влажной поверхности пиломатериалов появляется плесень, вызываемая различными грибами. Некоторые из них своими гифами быстро пронизывают толщу древесины, образуя синеву. Больше всего синевой поражается влажная древесина заболонной части сосны, а также кедра и лиственницы. Синевая не ухудшает заметно физико-механических свойств древесины, если не учитывать некоторого снижения сопротивления ударному изгибу. Однако она изменяет естественный цвет древесины, кроме того, способствует поражению древесины более опасными грибами, разрушающими древесную ткань.

Синевая не появляется при быстром просыхании пиломатериалов, например при разрыхленной их укладке и хорошем продувании штабеля сравнительно сухим воздухом (при $\varphi < 0,8$). При влажной погоде, а также в местах соприкосновения широких сырых прокладок с досками пиломатериалы часто поражаются синевой. Для предупреждения посинения следует применять разрыхленную укладку штабеля, а также антисептирование качественных пиломатериалов сразу же после их выпилки. Антисептирование — это кратковременная поверхностная обработка древесины растворами, обладающими на короткое время токсическими свойствами по отношению к грибам.

Наиболее эффективен порошкообразный препарат ГР-48, разработанный в ЦНИИМОД [54]. Рекомендуются концентрации растворов следующие, %: в мае, июне, сентябре и октябре при устойчивой хорошей погоде 0,5, при кратковременных дождях 1, при ожидаемых затяжных дождях 1,5; в июле и августе соответственно 1,5 и 2. Антисептируют в первую очередь пиломатериалы высших сортов. Особенно важно антисептировать тонкие сосновые пиломатериалы во второй половине лета, когда они будут высушиваться в более влажной воздушной среде.

Небольшое количество пиломатериалов антисептируют в ваннах с механизированным погружением в раствор. Однако предпочтительнее антисептировать целые пакеты (возможно более плотно уложенных досок), используя подъемные устройства. После погружения и некоторой выдержки (по ГОСТ 10950—75) пакет вынимают, избыточный раствор стекает, материал отправляют на склад и немедленно укладывают в штабеля.

Антисептирование рекомендуется проводить в основном на предприятиях, находящихся в первой и во второй климатических зонах; в осеннее время высококачественные пиломатериалы антисептируют и в остальных климатических зонах.

Санитарное состояние склада пиломатериалов

При неудовлетворительном состоянии склада пиломатериалов резко замедляется процесс сушки древесины, она поражается грибами, просыхает неравномерно, т.е. некачественно, и, кроме того, повышается пожарная опасность на складе.

Кустарники, высокая трава или сплошной забор вблизи штабелей пиломатериалов ухудшают низовое продувание их ветром, что приводит к задержке удаления влаги и ухудшению просыхания древесины в нижней части штабелей. Аналогичные и даже худшие последствия наблюдаются при захламлении межштабельных разрывов и подштабельных пространств прокладками, обломками пиломатериалов и целыми досками. Захламленные места не только задерживают движение воздуха, но служат еще источниками грибной инфекции. Находящиеся на земле опилки, древесный мусор, части деревянных устройств также загнивают.

Участки сбоку штабелей и под штабелями дезинфицируют 5%-ным раствором хлорной извести из расчета 5 л раствора на 1 м² площади. Деревянные фундаментные опоры должны быть консервированы. Прокладки, доски от крыш и других элементов штабеля, имеющие признаки синевы или гнили, должны быть немедленно удалены за пределы склада. Для укладки пиломатериалов, пораженных синевой и гнилями, отводится отдельный участок с подветренной стороны склада. В зимнее время штабельные крыши периодически очищают от снега;

в конце зимы от снега освобождают и площадь вблизи штабелей.

На складах пиломатериалов строго соблюдают правила пожарной безопасности, регламентируемые соответствующими инструкциями.

ГЛАВА 14. ОСОБЫЕ ВИДЫ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

88. СУШКА ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ

Основная особенность древесных стружек как объекта сушки — малые размеры частиц, при которых они приобретают свойство парусности — витания в потоках воздуха. При этом скорость сушки влажной древесины возрастает во много раз по сравнению с высушиванием ее в слое, продуваемом сушильным агентом. Главное требование к высушиванию этого материала — получение равномерной низкой конечной влажности древесины перед ее осмолением.

Частицы могут быть заостренной неправильной формы, в виде обломков спичечной соломки, или плоские, толщиной 0,1—0,8, шириной 2—10 и длиной до 40 мм. Скорость витания таких частиц 2—10 м/с. Влажность древесины, получаемой из внешней части сплавных бревен и сырых дров, в средних по широте и северных районах страны около 100%, а на юге около 60%; влажность используемых для плит опилок и стружки от деревообработки значительно ниже.

С учетом свойств материала и требований к результатам сушки наиболее эффективно применение прямоточного процесса (см. рис. 68, в). Горячий сушильный агент в начале сушки соприкасается с взвешенным в нем влажным, еще холодным материалом и резко снижает свою температуру. При этом мелкие частицы уносятся потоком газа (время их сушки сокращается до несколько секунд) с дифференциацией продолжительности сушки в зависимости от массы частицы.

При значительной турбулизации потока сушильного агента и тщательного раздробления в нем массы влажной стружки на отдельные частицы начальная температура сушильного агента может быть выше 500° С, а для сырой стружки выше 600—700° С. Поскольку топка располагается рядом и теплотери по короткому тракту газов незначительны, температура газов снижается в основном за счет присадки к ним воздуха. Поэтому с повышением температуры газов увеличивается содержание в них CO₂, следовательно, снижается опасность загорания материала как на загрузочном, так и на сухом конце сушильного агрегата. Одновременно сокращается длительность процесса и, что не менее важно, повышается тепловой КПД сушильной установки.

В начале процесса сушки желательна высокая относительная скорость движения частиц в газовом потоке. Коэффициент заполнения рабочего пространства стружкой должен повышаться по мере снижения ее влажности. Продолжительность высушивания всего потока стружки должна быть минимальной (доли минуты). Не исключена возможность воздушной сепарации частиц, совмещенной с сушкой. Таковы исходные предпосылки для получения рациональной технологии и техники высушивания частиц в массовых количествах.

Для высушивания измельченной древесины (стружки) предлагались различные способы и оборудование: контактная сушка на горячих металлических поверхностях; сушка на сетках с продуванием слоя материала нагретым воздухом или продуктами сгорания с различными их скоростями; сушка на сетках в кипящем слое, когда сушильный агент ограниченно поднимает частицы материала над сеткой и «кишит» на некоторой высоте над слоем; сушка пневматическая, во взвешенном состоянии, а также комбинации этих способов.

В индустриальном производстве древесностружечных плит, широко освоенном у нас в последние годы, для высушивания стружки применяют вращающиеся (4—9 об/мин) сушильные барабаны «Прогресс», диаметром 2,2 м и длиной 10 м, обогреваемые продуктами сгорания древесных отходов, мазута или природного газа. В барабанах есть лопатки, способствующие пересыпанию стружки при вращении барабана и дополнительному ее нагреванию (рис. 146).

Топку устраивают общую для трех барабанов (проект Гипродревпрома), с раздачей продуктов сгорания из общего газохода, имеющего ответвление к каждому барабану. Делают также индивидуальные топki для каждого барабана (проект Гипродрева). При сжигании природного газа или мазута предпочтительны индивидуальные топki.

Продукты сгорания выходят из топki с температурой 600—700° С. К ним можно добавлять наружный воздух, чтобы температура их при поступлении в барабан составляла 300—500° С; чем влажнее подлежащая сушке древесина, тем выше температура газов. Температура отходящих газов 100—120° С.

На рис. 146 слева изображена топка 1 с растопочной трубой 2 (в топках на древесных отходах), патрубком 3 для добавки свежего воздуха и газоходом 4, примыкающим через кольцевое уплотнение 5 к вращающемуся сушильному барабану 7. Одновременно с продуктами сгорания в барабан через трубу 6 с шлюзовым затвором поступает сырая стружка. Высушенная стружка отбирается дымососом 10 через патрубок 8, подключенный к сушильному барабану 7 через кольцевое уплотнение 11, и нагнетается через трубопровод 9 в циклон. Затем она поступает в бункер сухой стружки.

Продолжительность нахождения стружки в барабане 10—20 мин. В правом (выгрузочном) конце барабана процесс сушки резко замедлен; там в основном выравнивается конечная влажность стружки.

Производительность дымососа около $9 \text{ м}^3/\text{с}$; скорость поступательного движения газа на выгрузочном конце барабана 2 ... 3 м/с. Таким образом, газ проходит по длине барабана примерно за 3 с (объем горячего газа, следовательно, его скорость на загрузочном конце барабана в 2—3 раза больше и составляет 5—6 м/с).

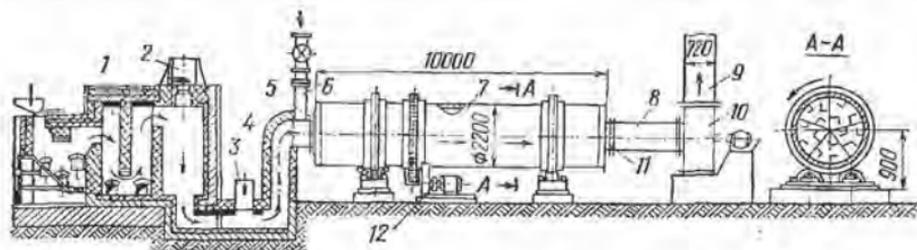


Рис. 146. Сушильный агрегат с барабаном «Прогресс»

В зависимости от форсирования работы сушильной установки и начальной влажности стружки в барабане удаляется влаги 1—4 т/ч; при начальной влажности стружки 100—110% этой массе влаги будет соответствовать масса высушенной стружки.

На 1 кг удаляемой влаги расходуется 4200—5000 кДж (1000—1200 ккал) тепла. Таким образом, при относительной влажности древесного топлива $W=45\%$, что соответствует [см. (52)] его нижней теплоте сгорания 9000 кДж/кг (2150 ккал/кг), на 1 кг сжигаемого топлива испаряется из материала 1,8—2,2 кг влаги, а на 1 м³ сжигаемого природного газа 6—8 кг влаги. Следовательно, при высушивании (зимой) стружки с начальной влажностью 100—110% для получения 1 т сухого продукта в час потребуются сжечь около 0,5 т/ч влажного древесного топлива. Площадь колосниковой решетки в топке должна быть при этом около $500/350=1,4 \text{ м}^2$, а объем камеры горения примерно 3 м³. Здесь 500 кг — среднее часовое количество сжигаемого топлива, 350 кг/м²·ч — напряжение зеркала горения колосниковой решетки. Процесс тепло- и массообмена значительно интенсифицируется при повышении скорости газа по влажному материалу, поэтому в начале процесса сушки эффективна турбулизация газового потока (на загрузочной половине барабана) по способу ВНИИДМАШа. Турбулизации достигают путем изменения направлений газа в загрузочном конце с заменой спирали лопатками, создающими подъем и затем витание стружки, а также двукратной последовательной (шаг 1 м) по-

перечной к длине барабана установки кольца и диска, пере-
крывающих попеременно (4 раза) больше половины сечения
барабана. В условиях турбулизации газового потока темпера-
турная кривая и кривая сушки материала показали резкое
ускорение процесса.

Сушильному барабану «Прогресс» в заводском изготовле-
нии придан уклон по ходу материала. Применительно к такому
легкому материалу, как древесная стружка, в условиях прямо-
тока уклон, приводящий к значительному осевому давлению
барабана и ускоренному поступательному перемещению струж-
ки, нежелателен. Горизонтальный барабан работает в опти-
мальных условиях его обслуживания и надежности эксплуата-
ции. Придание барабану постоянного обратного уклона также
не оптимальное решение. Материал задерживается в барабане
в нагретом состоянии длительное время (примерно в 10 раз
больше требуемого для сушки во взвешенном состоянии), что
отражается на прочностных свойствах древесины. Частицы
истираются. Затрудняется также удаление из барабана сколов.
Возникает большое осевое давление, сопротивление вращению,
износ катков. Нарушается герметичность концевых уплотнений.

Желательно хотя бы сезонно изменять величину заполнения
барабана стружкой, что достигается установкой на его выход-
ном конце обратной спирали в виде сменных лопаток, задер-
живающих стружку, монтируемых под углом $\approx 30^\circ$ к плоско-
сти вращения. Эффективна также подача диспергированной
сырой стружки в скоростной поток газов, выходящих из инди-
видуальной топки к барабану. При турбулизации газов и хоро-
шей герметизации в горизонтальном положении барабан пока-
зывает высокую производительность [среднее напряжение по
влаге примерно $100 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$].

За рубежом для высушивания стружки широко применяют
неподвижные сушильные барабаны циклонного действия «Бют-
тнер» (рис. 147, а). Газ подается в барабан 6 в касательном
направлении через сопла 8 с регулирующими заслонками, а ма-
териал для сушки поступает из питателя 7. В барабане мате-
риал приобретает спирально-вращательное движение, чему
способствуют также грабли, прикрепленные через рамку к ва-
лу 9. Сухой материал вместе с газовым потоком засасывается
из барабана в циклон 1, а очищенный отработанный газ венти-
лятором 3 частично выбрасывается через трубу 4 в атмосферу;
остающаяся часть газа по каналу 10 поступает в топку 11, от-
куда смесь топочного и рециркуляционного газа направляется
в сушильный барабан 6. Таким образом, сушильная установ-
ка — рециркуляционная. Вместо топки 11 для нагревания су-
шильного агента можно применять паровые или водяные кало-
риферы с давлением пара или горячей воды 1,2 ... 1,4 МПа
(12—14 атм). Напряжение барабана «Бюттнер» по влаге до
 $50 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$.

Недостатки барабана «Бюттнер»: а) подача нагретого газа одинаковых параметров по всей длине барабана, в том числе и к сухому его концу, где он мало охлаждается и частично выбрасывается в атмосферу; б) низкая температура подаваемого в барабан газа (до 260°C), обусловленная опасностью загорания стружки на сухом конце — этим предопределяется пониженный тепловой КПД установки; в) объем барабана мало используется для процесса сушки — стружка движется тонким слоем лишь у его цилиндрической стенки.

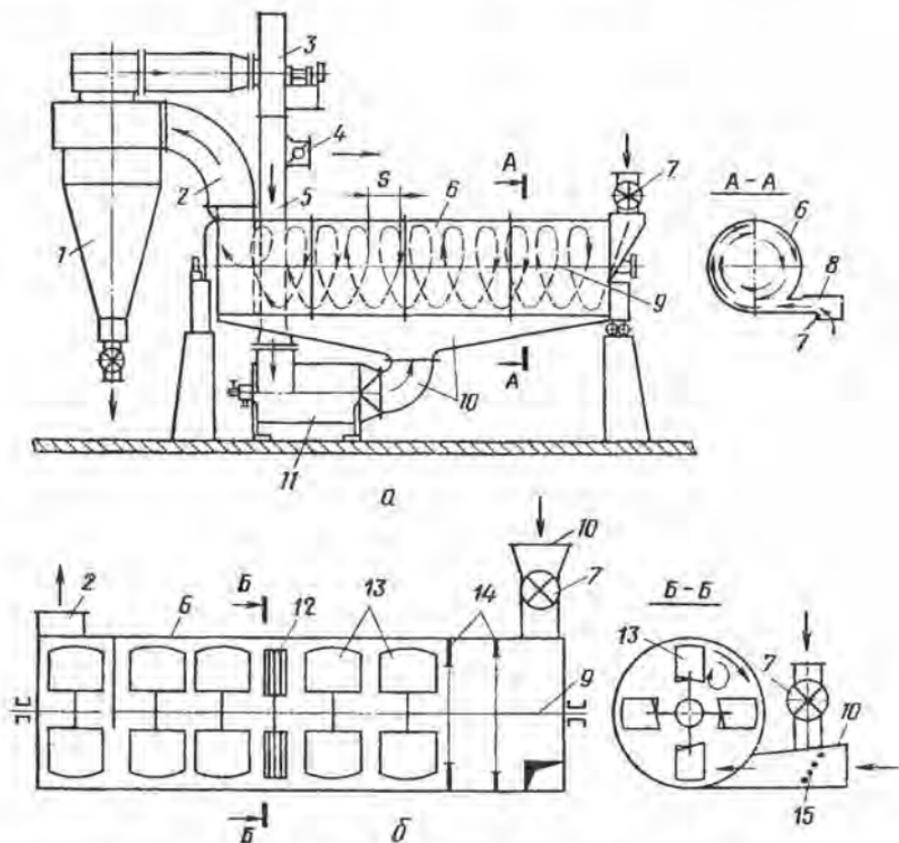


Рис. 147. Установки для сушки частиц во взвешенном состоянии:

а — «Бюттнер»; б — СВДС; 1 — циклон; 2 — отсасывающий трубопровод; 3 — вентилятор; 4 — труба отработанного газа; 5 — рециркуляционный трубопровод; 6 — сушильный барабан; 7 — питатель сырой стружки; 8 — сопло, подающее газ в барабан; 9 — вал; 10 — газозаход от топки; 11 — тонка; 12 — отражатель; 13 — лопатки на валу; 14 — кольцевые экраны; 15 — рыхлитель стружки

На рис. 147, б схематически показан неподвижный барабан СВДС свободный от этих недостатков. Из топки газ с температурой $500\text{--}700^{\circ}\text{C}$ поступает в газозаход 10, в который из питателя 7 подается сырая стружка и далее с большой скоростью по циклонному методу направляется в сушильный барабан.

Здесь газ и стружка приобретают спиральное движение, побуждаемое лопатками 13, приводимыми во вращение валом 9. Лопатки устанавливаются под разными углами, управляя заполнением барабана. Сухая стружка уносится по трубопроводу 2. Агрегат проверен в производственных условиях и показал высокую эффективность: напряжение по влаге — до 200 кг/(м³·ч), при продолжительности сушки 1—2 мин и аэродинамическом сопротивлении самого барабана до 200 Па (20 мм вод. ст.).

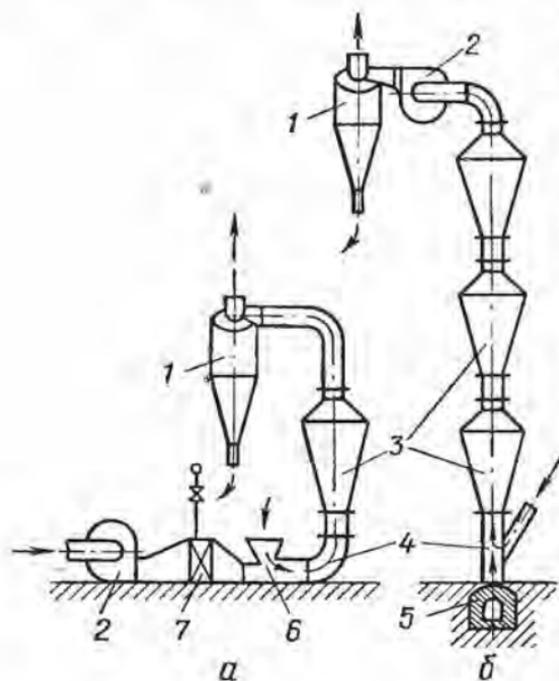


Рис. 148. Аэрофонтанный сушильный агрегат

За рубежом для высушивания стружки также применяют вращающиеся барабаны «Хейл», состоящие из трех совмещенных по длине разных по диаметру цилиндров, установленных соосно. Горячий газ вместе с сырой стружкой проходит последовательно внутренний цилиндр, затем кольцевое пространство между внутренним и средним цилиндром и после этого — кольцевое пространство между средним и наружным цилиндром. Между цилиндрами есть насадки (перегородки) в осевом направлении. Среднее напряжение по влаге до 100 кг/(м³·ч).

Фирма «Вавсоск» («Büttner + Schilde + Haas» в ФРГ) применяет рециркуляционную сушильную установку с аналогичным, но двухходовым барабаном, а также двухступенчатую сушильную установку из вертикальных труб.

Существует много других конструкций сушильных установок для стружки. Заслуживают внимания простейшие и удобные в небольших производствах трубы-сушилки, а также конусные рюмки в одну, две и три последовательно соединенных секции в вертикальном направлении.

На рис. 148, а показана односекционная аэрофонтанная сушильная установка с паровым обогревом. Материал подается в эжекционную загрузочную воронку 6, подхватывается струей нагретого воздуха и через трубу 4 поступает в сушильную рюм-

ку 3. По мере просыхания стружка выносится в циклон или сборный бункер 1. Воздух нагревается калорифером 7 и приводится в движение вентилятором 2. Желательно примененные вместо нагретого воздуха продуктов сгорания с более высокими температурами. При этом производительность сушильной установки значительно возрастает. Такая установка с тремя рюмками показана на рис. 148, б. Напряжение по влаге — до $100 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$.

В сушильных барабанах иногда* возникают загорания стружки и даже взрывы. Причины загораний — прекращение питания барабана сырой стружкой при продолжении подачи в нее продуктов сгорания из топки, наличие карманов в барабане с пересушенной и даже обугленной стружкой. Причины хлопков и взрывов — скопление пыли в системе по тракту стружки, отрыв ее в газовый поток, дисперсеризация и мгновенное сгорание. Не менее опасно нарушение режима работы топки с получением продуктов неполного горения (генераторного газа), заполняющих систему и поджигаемую искрой.

В зимнее время наблюдается увлажнение (смачивание) высушенной стружки в выведенных из здания наружу трубопроводах и циклоне, которые при охлаждении конденсируют влагу на внутренней поверхности. Желательно устраивать трубопроводы минимальной длины и теплоизолировать, а циклон размещать внутри цеха и также теплоизолировать. Температура точки росы газов в трубопроводе близка к t_m (рис. 149, а, справа), а температура его стенки в ветреную погоду близка к среднеарифметической в трубопроводе и снаружи. Стружка увлажняется также на участке от циклона до бункера, особенно при дополнительной пневматической ее транспортировке.

Из всех материалов в лесосушильной технике наиболее быстро высушивается древесное волокно — частицы длиной 5—10 мм и диаметром около 0,1 мм; продолжительность сушки таких частиц менее 1 с. Материал просыхает при прохождении вентилятора и участка трубы 1—2 м. Кинетику сушки этого продукта удобно изучать по падению температур на тракте волокна в газовом потоке. Из таких частиц изготавливают древесноволокнистые плиты сухим способом.

89. РАСХОД ТЕПЛА НА СУШКУ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

При сушке измельченной древесины расходуется много тепла и, следовательно, топлива. Сравним его с расходом при сушке условных пиломатериалов, когда из штабеля древесины вместимостью 15 м^3 требуется испарить $15 \cdot 200 = 3000 \text{ кг}$ влаги за 120 ч, т. е. $3000 : 120 = 25 \text{ кг}/\text{ч}$. Из стружки, высушиваемой в барабане «Прогресс», удаляется влаги в среднем $2500 \text{ кг}/\text{ч}$, т. е. в 100 раз больше. Следовательно, 1 барабан по съему влаги эквивалентен 100 штабелям пиломатериалов или 20 пятишта-

Тепловой КПД η барабана

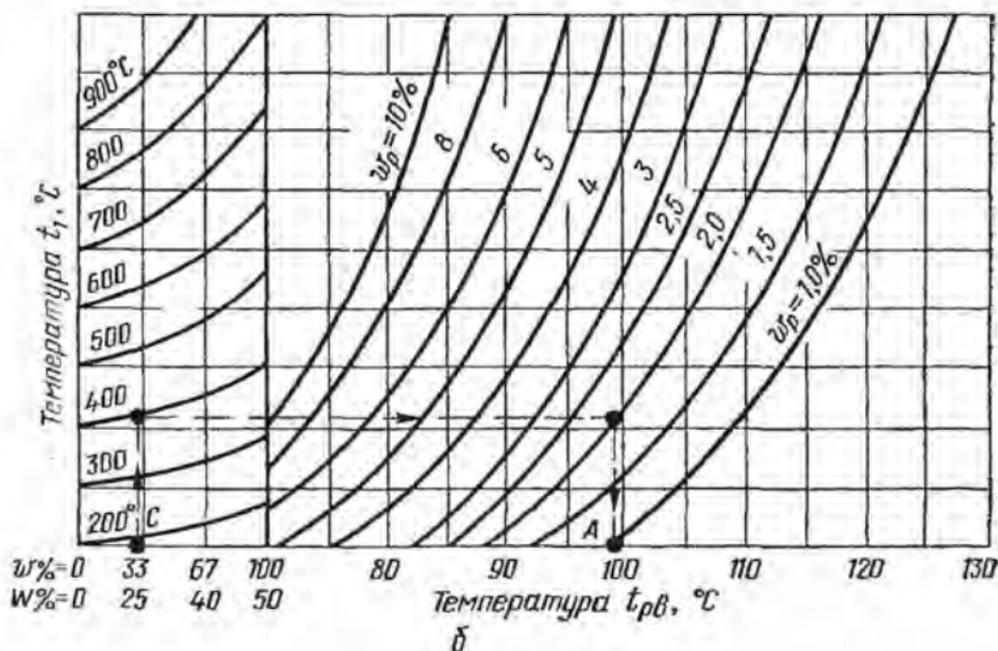
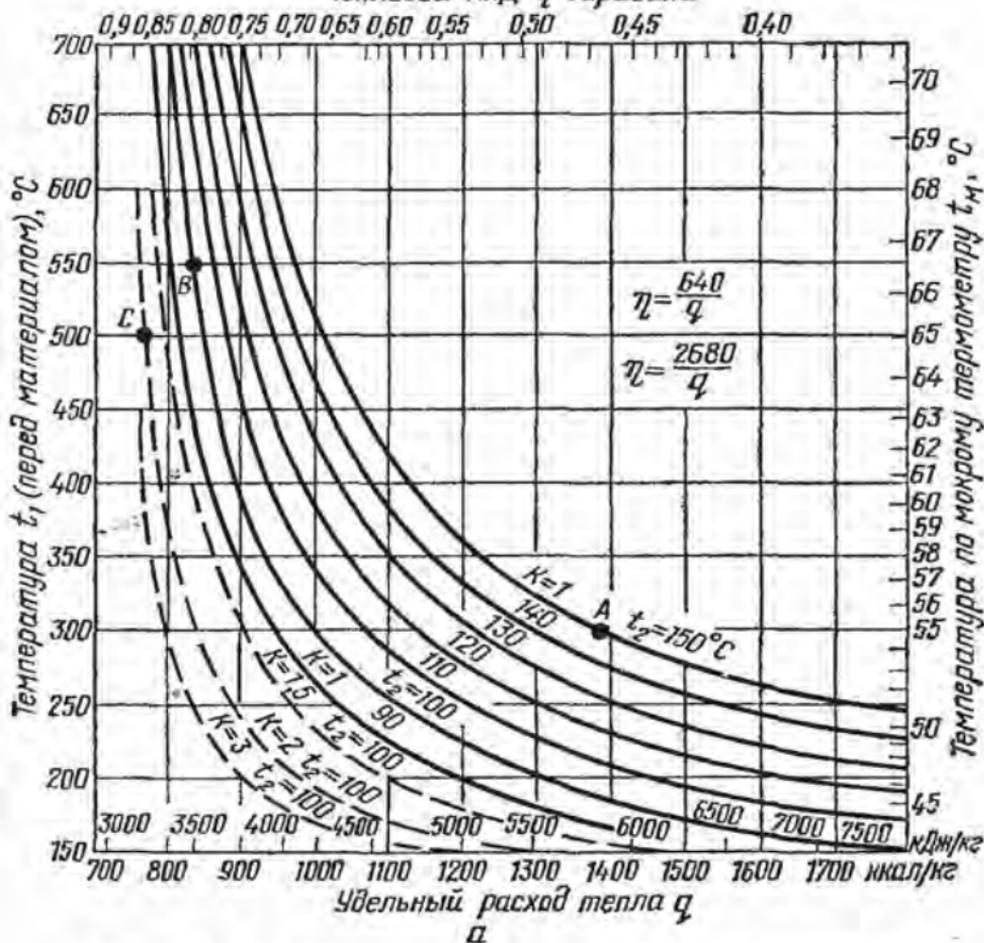


Рис. 149. Диаграммы процесса высушивания стружки

большим сушильным туннелям. Однако в цехах древесностружечных плит работают по 3—4 барабана, что эквивалентно 60—80 туннелям с пиломатериалами. Их тепломощность (влажносъем) дополнительно увеличивают. Отсюда очевидна значимость проблемы экономного расходования тепла в цехах древесностружечных плит.

Расход тепла будет тем меньше, чем выше t_1 на входе в барабан и ниже t_2 на выходе. При увеличении разности $t_1 - t_2$ снижается также расход энергии на перемещение более охлажденного газа с меньшим его объемом.

Для теоретического процесса сушки продуктами сгорания без рециркуляции, получаемыми при сжигании мазута с тепловым КПД топки 0,8, расход тепла q на испарение 1 кг влаги находят по формуле

$$q = \frac{3220t_2 - 63\,600}{t_1 - t_2} + 2,22t_2 + 2680 \text{ (кДж/кг)},$$

$$\left[\text{или } q = \frac{770t_2 - 15\,200}{t_1 - t_2} + 0,53t_2 + 640 \text{ (ккал/кг)} \right]. \quad (268)$$

Эта зависимость представлена графически на рис. 149, а. Сплошными кривыми даются значения t_2 без рециркуляции, а пунктирными — с рециркуляцией газов. Справа на диаграмме приведена температура по мокрому термометру при сжигании мазута или абсолютно сухой древесины ($W=0\%$) и сушке без рециркуляции.

Например, в случае $t_1=300^\circ\text{C}$ и $t_2=150^\circ\text{C}$ (точка А) величина q определится 5800 кДж/кг (1380 ккал/кг), $\eta=0,46$; при $t_1=550^\circ\text{C}$ и $t_2=100^\circ\text{C}$ (точка В) величина q составит 3470 кДж/кг (830 ккал/кг), т. е. в 1,7 раза меньше.

В условиях сжигания природного газа, а также древесины влажностью $W=24\%$, т. е. $w=32\%$ [см. (50)], когда продукты сгорания будут иметь большее влагосодержание, расход тепла увеличится на 5%. В случае сжигания древесных отходов влажностью $W=45\%$ ($w=82\%$) расход тепла возрастет на 14%, а топлива почти в 2 раза по сравнению с его расходом при влажности, равной нулю.

Значимость рециркуляции учитывается по температуре и количеству газов. Так, при массовой кратности циркуляции, равной 2 (т. е. массы рециркулирующего и поступающего из топки газов одинаковы) и $t_1=500^\circ\text{C}$, $t_2=100^\circ$ (точка С) температура газов из топки без учета неодинаковой их теплоемкости будет около $500 + (500 - 100) = 900^\circ\text{C}$. При этом $q=3220$ кДж/кг (770 ккал/кг), $\eta=2680/3220=0,83$. Следовательно, при одинаковой температуре t_1 газов, подаваемых к материалу, рециркуляция значительно повышает тепловой КПД процесса сушки, а также t_m и CO_2 , снижая опасность загорания материала (особенно в случае автоматизации процесса).

На рис. 149, б дана зависимость для равновесной температуры (см. параграф 21) отработанного газа: $t_{рв} = f(W, \omega_p, t_1)$.

Например, при сжигании древесного топлива влажностью $W=24\%$, температуре перед материалом $t_1=400^\circ\text{C}$ и влажности высушенной стружки $\omega_2=2\%$ (см. пример пунктиром) равновесная температура отработанного газа должна быть немногим больше 99°C (в точке А $t_{рв}=99^\circ\text{C}$). Для мазута принимается на шкале внизу слева влажность топлива $W=0$, а для природного газа $W=24\%$, т. е. $\omega=31\%$. Отсюда находят требуемые $t_2 \geq t_{рв}$.

90. АВТОМАТИЗАЦИЯ СУШКИ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Процесс высушивания древесной стружки быстротечный; возникает актуальная задача по его автоматизации, с помощью которой улучшается качество (равномерность влажности) высушиваемого продукта и облегчаются условия обслуживания

сушильной установки, а ее эксплуатация становится более надежной. Следует учитывать, что в прямоточном барабане кривые $t(\tau)$ и $\omega(\tau)$ аффинны, что способствует раскрытию процесса (см. рис. 68, в).

Надежен и эффективен в работе на сушильном барабане «Прогресс» метод ВНИИДМАШа, принципиальная схема которого показана на рис. 150. При этом стабилизации влажности высушенной стружки достигают, автоматически изменяя температуру газов на входе в барабан 4 в зависимости от их температуры на выходе за счет изменения

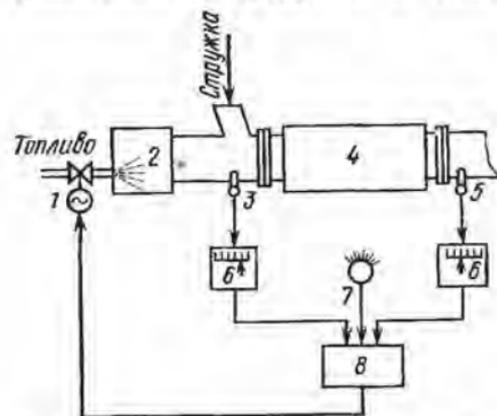


Рис. 150. Принципиальная схема автоматического регулирования сушильного процесса в барабане «Прогресс»:

1 — исполнительный механизм; 2 — топка; 3, 5 — датчики температуры; 4 — сушильный барабан; 6* — измерительные приборы; 7 — задатчик; 8 — регулирующий прибор

подачи топлива (природного газа или мазута) в топку 2 при постоянной добавке охлаждающего продукты сгорания воздуха. В случае прекращения подачи стружки система выключает процесс сушки, а при возобновлении ее подачи вновь вводит барабан на нужный режим. Систему комплектуют из стандартных приборов.

По этой системе автоматизации на входе газа в барабан и выходе его устанавливаются датчики температуры 3 и 5. Сигналы от датчиков поступают в измерительные приборы 6. Преобразованные сигналы направляются в регулирующий прибор 8, который управляет исполнительным механизмом 1, изменяющим подачу топлива в топку 2 с тем, чтобы сохранилось соот-

ношение температур газа t_1 и t_2 на входе в барабан и на выходе.

Используют следующие приборы на один барабан: измерительный прибор ЭПВ2-06 ХК 0—200°С, то же на 0—600°С; регулирующий РПИВ-Ш, исполнительный механизм МЭО 25/120П.

91. ПРИМЕНЕНИЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

В отличие от конвективной сушки, при которой теплота передается от сушильного агента поверхности материала и затем медленно, теплопроводностью, проникает во внутренние его зоны — при высокочастотном воздействии облучаемый материал нагревается одновременно (диатермически) по всему сечению.

Известно, что диэлектрик, помещенный в переменное электромагнитное поле, нагревается вследствие колебательного движения его полярных молекул, непрерывно ориентирующихся в направлении меняющегося поля (молекулярное трение). Влажная древесина практически может считаться несовершенным слоистым диэлектриком. Будучи очень сложным молекулярным комплексом, она взаимодействует с электромагнитным полем как среда из полярных (дипольных) и неполярных молекул.

Испарение влаги из древесины в поле токов высокой частоты (ТВЧ) — прямое следствие ее нагревания. Специфических воздействий ТВЧ на древесинное вещество (гигроскопичность, прочность и т. д.) не установлено. Испарение влаги из древесины происходит в такой же степени, как и при нагревании ее любым другим способом. Однако при воздействии длинных волн на очень влажную древесину наблюдается электроосмос — явление, заключающееся в выделении из древесины в жидкой фазе части свободной влаги.

Облучением древесины ТВЧ достигается самый совершенный способ сушки. В случае внешнего охлаждения в середине сечения доски устанавливается повышенная температура, что приводит к термодиффузии влаги и ускорению процесса сушки. Градиенты влажности и опасность растрескивания материала резко снижены [61]. В этих условиях в середине сечения материала возникает локальная повышенная текучесть древесины. Этим создаются благоприятные условия для высушивания без растрескивания крупных по сечению, в том числе сердцевинных пиломатериалов [7].

Основные его преимущества: сокращение продолжительности сушки сосновых пиломатериалов в 10—20 раз, лиственных рассеяннососудистых (береза, бук) в 10 раз и более по сравнению с обычной конвективной сушкой. К его существенным недостаткам относятся: низкий КПД установки по использованию

тепла, считая на исходное топливо (около 0,04), а отсюда — очень высокая стоимость сушки материала; ненадежность сушильных установок в работе, сложность управления и опасность в эксплуатации; необходимость тщательного экранирования электромагнитных волн для предотвращения помех.

Разрабатывался также комбинированный способ сушки древесины, заключающийся в том, что теплопотери, а также испарение части влаги из материала возмещаются за счет дешевого вида тепловой энергии, например от паровых калориферов. На продвижение влаги в материале из середины сечения к поверхности расходуется энергия поля высокой частоты.

Предлагался высокочастотно-вакуумный метод сушки, заключающийся в нагревании древесины ТВЧ в вакууме [62] и [63]. При этом снижается температура вскипания влаги внутри сортимента; повышается в нем давление пара и возникает дополнительный молярный поток влаги. Имеется негативный опыт по применению высокочастотных сушильных установок на многих предприятиях в 1950—1960 гг.

ГЛАВА 15. ЭКОНОМИКА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

§2. УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ПАРА, ТОПЛИВА И ЭНЕРГИИ НА СУШКУ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

При количественной оценке процесса сушки пиломатериалов в тепловом отношении расход теплоты относят к 1 кг испаряемой влаги, а удельный расход пара на сушку — также к 1 кг испаряемой влаги или к 1 м³ высушиваемого материала. Расход топлива в газовых сушильных установках выявляют в процентах к объему высушиваемых пиломатериалов, считая влажность топлива около $w=70 \dots 90\%$ ($W=41 \dots 47\%$). Для значительно отклоняющейся влажности топлива делают поправку, учитывающую его иную низшую теплоту сгорания (52).

Расход теплоты на 1 кг испаряемой влаги зависит от ряда факторов. Основные из них — характеристика высушиваемого материала (порода, толщина, влажность и т. д.), режимные условия сушки, длительность процесса, тип, конструкция и состояние сушильной установки, климатические условия, время года и др.

В разных системах сушильных установок сравнительную потребность тепла учитывают удельным расходом одинакового топлива на сушку 1 м³ условных пиломатериалов в среднегодовых условиях.

Расход пара и топлива в паровых сушильных установках

При сушке влажных тонких хвойных пиломатериалов в хорошо налаженном сушильном туннеле летом расходуется 1,7—2 кг пара на 1 кг испаряемой влаги, или около 0,4—0,5 т пара на сушку 1 м³ древесины. Эти цифры удельного расхода пара приближаются к минимальным; они могут еще более уменьшиться при использовании физической теплоты конденсата, теплоты отработанного воздуха (в условиях низкотемпературной сушки) и нагретого высушенного материала, а также при лучшей теплоизоляции ограждений, в первую очередь дверей, перекрытия и паропроводов.

При длительном высушивании (например, около 1 мес) трудносохнущего материала, нуждающегося к тому же в периодической влаготеплообработке, расход пара на 1 кг испаренной влаги возрастает до 8—10 кг и более, достигая 3 т и более на 1 м³ древесины.

Теплота в сушильной камере расходуется на испарение влаги, нагревание материала и подвижного состава независимо от длительности процесса и на возмещение теплотерь через ограждения, пропорциональных продолжительности сушки. При высушивании хвойных пиломатериалов для приближенных расчетов удельного расхода пара D (кг/кг) в среднегодовых условиях может служить формула

$$D = 1,5 + a(t_1 - t_0) \tau, \quad (269)$$

где $t_1 - t_0$ — разность температур воздуха в камере и вне ее; a — коэффициент теплотерь, зависящий от состояния камеры, расходования пара на промежуточные прогревы материала и местных условий; в среднем для сушильных туннелей его можно принять 0,002, а для сушильных камер 0,003; τ — продолжительность процесса, сут.

По этой формуле при сушке условного материала удельный расход пара в средних температурных условиях примерно равен: $D = 1,5 + 0,003 \cdot 80 \cdot 5 = 2,7$ кг/кг влаги, а в сушильном туннеле $D = 1,5 + 0,002 \cdot 80 \cdot 5 = 2,3$ кг/кг влаги. Для получения этого пара в котельной сжигается около 40% влажного древесного топлива от объема высушиваемой древесины.

В газовых сушильных установках удельный расход древесного топлива B_d в среднегодовых условиях также определяют по упрощенной формуле

$$B_d = 0,1 + b(t_1 - t_0) \tau, \quad (270)$$

где $b = 0,0002$ для туннелей и 0,0003 для камер.

Ориентировочно можно считать, что при прочих равных условиях в газовых сушильных установках расходуется в 1,8—2,1 раза меньше топлива, чем в паровых: расход топлива равен 0,18—0,22 от объема высушиваемой древесины.

При сжигании в газовых сушильных установках природного газа его расход B_r ($\text{м}^3/\text{м}^3$) (см. табл. 5) на кубический метр высушиваемого материала равен

$$B_r = 15 + C(t_1 - t_0)\tau, \quad (271)$$

где C — коэффициент расхода газа (0,06 для камер, 0,04 для туннелей).

Для условий $t_1 - t_0 = 80^\circ\text{C}$ получим: в камере $B_r = 15 + 0,06 \cdot 80 \cdot 5 = 39 \text{ м}^3/\text{м}^3$; в туннеле $B_r = 15 + 0,04 \cdot 80 \cdot 5 = 31 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Таким образом, расход природного газа в среднегодовых условиях будет приблизительно соответствовать 40—30-кратному объему высушенной древесины. Для паровых установок этот расход газа (в котельной) удваивают.

Расход энергии на вращение вентиляторов

В одной и той же сушильной камере расход энергии постоянен во времени и, следовательно, обратно пропорционален ее производительности (без простоев).

Если на вентиляторах камеры установлены электродвигатели, потребляющие мощность N (кВт), годовой расход энергии \mathcal{E} при работе в течение 300 сут составит

$$\mathcal{E} = 24 \cdot 300N = 7200N. \quad (272)$$

Удельный расход электроэнергии на 1 м^3 высушиваемых условных пиломатериалов

$$\mathcal{E}_y = 7200N/U, \quad (273)$$

где U — известная заранее годовая производительность камеры в условном материале (см. § 81).

Удельный расход электроэнергии на 1 м^3 фактически высушиваемого материала можно определить с учетом (263), если вместо Φ подставить $250 UK/\tau$ (где τ в часах)

$$\mathcal{E} = 7200N/\Phi = 7200N\tau/(250 UK). \quad (274)$$

Например, в сушильной камере с условной годовой производительностью 3000 м^3 пиломатериалов и полностью нагруженным электродвигателем мощностью 14 кВт высушиваются обрезные доски толщиной 32 мм ($K=0,413$; см. табл. 30) в течение $\tau=3$ сут (72 ч); удельный расход энергии

$$\mathcal{E} = \frac{7200N\tau}{250UK} = \frac{7200 \cdot 14 \cdot 72}{250 \cdot 3000 \cdot 0,413} = 23,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3.$$

Из (273) и (274) следует, что

$$\mathcal{E} = 0,004 \mathcal{E}_y \tau / K, \quad (275)$$

т. е. расход энергии в каждой сушильной установке при $\mathcal{E}_y = \text{const}$ пропорционален $0,004 \tau$ (τ — расчетное), деленному на коэффициент заполнения штабеля K или по (275) и (263) пропорционален U/Φ , т. е.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_y U / \Phi. \quad (276)$$

Отношение U/Φ удобно брать по нижней шкале диаграммы на рис. 138. Чем тоньше материал, тем меньше \mathcal{E} .

Например, по вертикали $U/\Phi = 1,6$ (см. рис. 138) и формуле (276) устанавливаем, что при высушивании 1 м^3 пиломатериалов дубовых толщиной 14 мм, лиственничных $T = 21$ мм, березовых $T = 56$ мм, сосновых $T = 72$ мм и еловых $T = 78$ мм расход энергии будет одинаковым (в 1,6 раза больше, чем при сушке условного материала, т. е. сосновых досок толщиной 50 мм — точка А).

93. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

К основным технико-экономическим показателям лесосушильных установок, в том числе производственным, технологическим и эксплуатационным, относятся: а) проектная и действительная годовая производительность сушильной установки в условном исчислении; б) удельные капитальные затраты на 1 м^3 условной годовой производительности; в) себестоимость сушки 1 м^3 условного материала; г) вместимость камеры или туннеля в кубических метрах условного материала и число камер (туннелей); д) скорость сушильного агента по материалу (расчетная и фактическая); е) расход электроэнергии для привода вентиляторов и на 1 м^3 высушиваемого условного материала; ж) тип калориферов и поверхность их нагрева на камеру; з) часовая потребность пара на камеру и сушильный цех; и) расход пара на высушивание 1 м^3 условных пиломатериалов и на 1 кг испаряемой влаги из сосновых пиломатериалов толщиной 25 и 50 мм; к) оснащенность погрузочно-разгрузочными механизмами.

Значение и содержание этих показателей заключается в следующем.

Годовая производительность с указанием назначения — основной производственный показатель установки. Данные о проектной и действительной производительности позволяют судить о мощности и степени использования по назначению сушильной установки.

Удельные капитальные затраты и стоимость сушильной установки — показатель технико-экономический. В стоимость паро-

вых установок следует включать затраты на устройство и оборудование котельной, которые составляют примерно половину стоимости готовых к работе сушильных камер. Если котельная обслуживает несколько цехов, ее стоимость распределяется пропорционально стоимости пара, отпускаемого каждому цеху.

В газовых сушильных установках нет паровых калориферов. В них устраивают топку со средствами топливоподачи. Стоимость паровых калориферов с паропроводами, с одной стороны, и топки с топливоподачей, с другой — примерно одинакова. Таким образом, стоимость паровых сушильных установок обходится примерно (с учетом стоимости котельной) в 1,5 раза дороже, чем стоимость газовой установки той же вместимости. Следует, однако, учитывать возможность форсированного ведения процесса сушки нетолстых хвойных пиломатериалов непосредственно продуктами сгорания с увеличением примерно на $\frac{1}{3}$ производительности по сравнению с производительностью паровой установки. В результате этого капитальные затраты на устройство газовых сушильных установок ориентировочно в 2 раза меньше, чем стоимость паровых установок, на 1 м³ условных пиломатериалов.

Приближенно можно считать удельную стоимость средней мощности стационарных паровых сушильных туннелей 7 руб., камер 10 руб., а с учетом стоимости требуемой части котельной и пароманевральной — соответственно 10 и 15 руб.; стоимость газовых установок около 5—7 руб. на условный 1 м³ годовой производительности.

Себестоимость сушки — производственно-экономический показатель, являющийся основным эксплуатационным измерителем сравнительной эффективности использования сушильных установок [11]. Метод его определения и его значение рассматривались ранее.

Вместимость камер и их число показывают маневренность работы сушильного цеха и удобство его эксплуатации. Строительство и эксплуатация крупных камер дешевле, но такие камеры менее пригодны для сушки небольших партий материала. Во многих случаях в одном сушильном хозяйстве целесообразны камеры разной вместимости, но с одинаковым габаритом штабелей. Чем выше продолжительность сушки материала, тем больше количество камер в сушильном цехе. Например, интересно отметить, что на Армавирской колодочной фабрике эксплуатируют больше 100 камер ($\tau \approx 50$ сут).

Скорость сушильного агента и его реверсивность по материалу — показатель технического уровня и совершенства сушильной установки. Следует, однако, иметь в виду действительную (при сушке материала толщиной 25 мм, нуждающегося в значительной скорости), а не проектную скорость сушильного агента, которая часто в 2 раза выше действительной скорости. Проектировщики упускают из виду большие перетека-

ния воздуха мимо штабеля, а эксплуатационники обычно недостаточно заботятся о поддержании вентиляторов, эжекционных систем, самих сушильных камер и туннелей в надлежащем техническом состоянии.

Остальные показатели не нуждаются в пояснениях.

94. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ЛЕСОСУШИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Основной признак для суждений о технологическом совершенстве различных сушильных установок (качественный показатель) — *равномерность просыхания в них пиломатериалов* по объему штабеля. Соблюдение этого главного технологического параметра зависит в основном от направления и скорости циркуляции воздуха по высушиваемому материалу, т. е. предопределяется конструктивными признаками установки.

Важный критерий также — надлежащее управление сушильным процессом, чтобы сухой материал имел *конечную влажность не выше заданной* в пределах допустимых отклонений, в том числе по его сечению.

Далее приведены наиболее существенные рекомендации, излагаемые в порядке их актуальности, по совершенствованию существующей на предприятиях лесосушильной техники с разделением их на две группы — мероприятия, не нуждающиеся в значительных расходах, реализуемые в текущей работе сушильного цеха, и мероприятия, выполняемые в виде плановых капитальных работ с соответствующими затратами по совершенствованию техники и производства.

Практика обследования сушильных цехов показывает, что многие их недостатки являются общими. Их устранение повысит эффективность производства.

1. Надлежит коренным образом улучшить качество укладки пиломатериалов для сушки: методы рациональной их укладки рассматривались в параграфе 68. Систематически надо проверять толщину прокладок, отбрасывая негодные; применять фиксаторы прокладок (см. рис. 128, б) и т. д.

2. Следует тщательно герметизировать сушильные камеры и туннели. Дополнительно к изложенному в параграфах 56 и 70, а также изображенному на рис. 107 для герметизации дверей рекомендуется применять подъемные отрезки рельсов длиной около 1200 мм на концах туннелей. Отрезки шарнирно крепят к рельсам внутри туннеля. Перед закрытием дверей они поднимаются и опираются на штабель (по опыту ДОКа в Щекино, Тульской обл.).

Проще герметизировать нижнюю часть двери, устроив изнутри камеры (или туннеля) примыкающий к полотну двери бетонный борт высотой 40 мм над головкой рельсов. Борт формируют по месту при хорошо закрытых дверях (по профилю их

внутренней поверхности), с оставлением узких (по 15 мм) про-светов, высотой около 10 мм сбоку верхней части головок рель-сов для прохождения реборд колес загрузочных трекков.

3. Надо надежно экранизировать штабеля, преградив пара-зитные потоки воздуха мимо материала (см. рис. 80, а, б, 5 и 2, рис. 95, 11 и 10).

4. Следует проводить ежечасное (желательно, автоматиче-ское) реверсирование потока воздуха по материалу в реверсив-ных камерах.

5. Следует отрегулировать работу конденсатоотводчиков. С помощью контрольного крана ежедневно проверять их исправность.

6. При эксплуатации камер с эжекционной циркуляцией воздуха, а также газовых туннелей в целях их надлежащей отладки и правильного обслуживания надо пользоваться ин-струкцией ЦНИИМОД [13].

7. Следует привлечь ОТК предприятия к контролю за каче-ством укладки пиломатериалов в штабеля, а также за соблю-дением требуемой конечной влажности древесины. Решительно не допускать выпуска недосушенных пиломатериалов; в случа-ях сомнения в величине конечной влажности древесины пред-почитать небольшую пересушку.

Необходима модернизация большинства конструкций, экс-плуатируемых в промышленности сушильных камер:

1. Реверсивная фактическая скорость воздуха по высуши-ваемому материалу в штабеле шириной 1,8 м должна быть более 2 м/с, а для расчета производительности вентилятора — не ниже 3 м/с. При нереверсивной циркуляции скорость возду-ха удваивают. В случае иной ширины штабеля скорость изме-няют пропорционально его ширине, а в туннелях повышают до 4—5 м/с.

2. Должна быть достигнута герметичность камер, чтобы на протяжении процесса сушки не требовалась добавка в камеру увлажнительного пара, т. е. в камерах должно поддерживаться достаточное влагосодержание воздуха для ведения заданных сушильных процессов. Воздухообменные устройства часто за-крывают наглухо.

3. Ограждения камер должны быть теплоизолированы в та-кой мере, чтобы в зимнее время в начальной стадии сушки на внутренней их поверхности после прогрева стен не было кон-денсации влаги.

4. Тепловая система камер и теплоснабжение (применитель-но к зимним условиям) должны быть улучшены, чтобы можно было осуществлять нужные режимы сушки. На паромагистра-ли устанавливают редукционный клапан.

5. Следует обеспечить возможность выполнения конечной влаготеплообработки материала, высушиваемого по I и II ка-тегориям качества сушки.

6. Туннели приспособливают к ведению прерывистых режимов сушки.

7. Применяют прижимы для верха штабелей (см. рис. 133 и 161).

ГЛАВА 16. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

95. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Основные положения

Задача по рациональному проектированию сушильных установок сложна по многообразию производственных условий, большому различию высушиваемых сортиментов, недостаточной изученности протекающих сушильных процессов, высокого влагосодержания и агрессивности сушильного агента по отношению к обычным строительным материалам ограждений и трудности учета экономических показателей. Поэтому в промышленности наблюдается многообразие различных конструктивных решений.

Желательно выявить и принять за основу проектирования обоснованные исходные принципы и практически проверенные прогрессивные технические предпосылки.

В качестве базового технического положения, относящегося к проектированию любых сушильных установок, можно отнести в первую очередь возможность проведения в них сушильного процесса с высоким качеством сушки материала. Стоимость самих пиломатериалов в 10 раз и более превышает стоимость их высушивания. Брак сушки или снижение качества высушиваемой древесины поэтому не должны допускаться.

К основным качественным признакам, зависящим от системы и конструкции сушильной установки, относятся сохранение прочностных свойств натуральной древесины, возможность точного высушивания материала до заданной конечной влажности, равномерность просыхания древесины по объему штабеля и недопущение коробления пиломатериалов в верхних его рядах.

При массовой сушке пиломатериалов важное значение приобретает стоимость тепла на сушку и трудовых операций по погрузке—разгрузке и транспортировке.

Рекомендуется использовать комбинированную сушку пиломатериалов (атмосферную и конвективно-тепловую) на базе единого пакета или штабеля.

Двукратной конвективно-тепловой сушки пиломатериалов следует по возможности избегать. Пиломатериалы массового целевого применения, подлежащие транспортировке (исполь-

зубы в строительстве, тарном производстве и т. д.), следует высушивать однократно до требуемой конечной влажности. Пиломатериалы безличных, товарные также лучше высушивать не до транспортной (16—20%), а до более низкой, примерно до условной конечной влажности (12%), учитывая возможность использования их без досушки обесличенными массовыми потребителями (в строительстве) или частично с малой досушкой — для изготовления мебели, моделей и т. д. Известно, что в условиях обычной перевозки железнодорожным или автомобильным транспортом влажность сухой древесины (в диапазоне 10—15%) изменяется незначительно как в зимнее, так и в летнее время. Перевозка излишней влаги во всех случаях нецелесообразна.

Для крупных сушильных цехов следует применять штабеля увеличенных размеров (см. табл. 15), а для небольших цехов — уменьшенные по сравнению с существующими типовыми (сечением $1,8 \times 2,6$ м).

Нормативное число дней работы сушильных установок в году ранее было 335. Однако при сушке нетолстых пиломатериалов на предприятиях с двумя выходными днями сушильные камеры и туннели к понедельнику оказываются заполненными сухими пиломатериалами и временно выключаются, поэтому число дней их работы в году можно принять около 300. Когда на каком-либо предприятии продолжительность сушки большинства обрабатываемых пиломатериалов составляет более 5 суток, число рабочих дней в году для сушильных камер может быть 335. Однако такие производственные условия редки.

Рекомендации для проектирования камер

В расчетах вентиляторной системы следует предусматривать запас количества воздуха на прохождение его мимо штабеля пиломатериалов. При хорошей экранизации по периметру штабеля можно в среднем принять, что мимо материала перетекает половина объема воздуха, проходящего через штабель. Таким образом, расчетную производительность вентиляторной установки сушильной камеры следует предусматривать увеличенную на 50% (коэффициент 1,5) по сравнению с требуемой для получения заданной скорости воздуха по материалу внутри штабеля. В сушильных противоточных туннелях при хорошей экранизации штабелей материала следует принимать такой же коэффициент.

При высушивании различных сортиментов хвойных пород тепловой и аэродинамический расчеты проводят применительно к высушиванию в зимних условиях пиломатериалов толщиной 25 мм, нуждающихся в повышенном количестве тепла и воздуха по сравнению с более толстыми пиломатериалами.

Расчетную скорость воздуха в камерах, как и при модернизации, принимают не менее 3 м/с, а в туннелях — 4 м/с. При вертикальном сечении штабеля до сушки $6,6 \times 2,7 = 17,8 \text{ м}^2$ поток воздуха, подаваемого вентиляторной системой камеры на один штабель, $K_n \approx 0,5$ должен быть выше $17,8 \cdot 3 \cdot 0,5 = 27 \text{ м}^3/\text{с}$, или более $100\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$. При высушивании более тонких пиломатериалов количество воздуха на штабель увеличивают вплоть до его удвоения. В туннелях Валмет [45] подается именно такое количество воздуха ($200\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$). При высушивании толстых пиломатериалов количество воздуха, подаваемого в штабель, может быть уменьшено. В соответствии с (213) при $l = \text{const}$, применительно к сушильным камерам получим

$$\bar{v} = b/\sqrt{T}. \quad (277)$$

В условиях постоянных значений ω_n и ω_k [см. (180)] приобретает вид

$$\tau = aT^{3/2}. \quad (278)$$

Подставив значение T из (278) в (277), найдем

$$v = k/\sqrt[3]{\tau}. \quad (279)$$

В этих формулах b , a , k — взаимозависимые коэффициенты, $k = b\sqrt[3]{a}$.

Сопоставив для разных материалов потребные для них скорости воздуха v при различных значениях τ с установленной скоростью v_1 для материала толщиной 25 мм и с известной его величиной τ_1 на основании предыдущих соотношений получим

$$v = v_1 \sqrt[3]{\tau_1/\tau}. \quad (280)$$

Таким образом, в сушильных камерах сопоставимая скорость воздуха по пиломатериалам обратна кубическому корню из продолжительности их сушки [см. (280)], а при одинаковых прочих условиях — скорость воздуха по материалу обратна корню квадратному из его толщины [см. (277)].

Например, продолжительность сушки сосновых досок толщиной 25 мм от начальной влажности 50% до конечной 8% в камерах обычной теплоемкости по II категории качества сушки $\tau_1 = 2$ сут, при этом $v = 3$ м/с. Тогда для материала с продолжительностью сушки $\tau = 16$ сут соответствующая расчетная (по производительности вентилятора) скорость воздуха

$$v = 3 \sqrt[3]{2/16} = 3 \cdot 1/2 = 1,5 \text{ м/с}.$$

То же получим, сравнивая только толщины T и T_1 материала [см. (277)]:

$$v = 3 \sqrt[3]{25/100} = 3 \cdot 1/2 = 1,5 \text{ м/с}.$$

где 100 — толщина T сосновых досок с продолжительностью сушки 16 сут (см. табл. 25—28), мм; 3 — исходная скорость v_1 воздуха (для сосновых досок толщиной 25 мм), м/с.

Величина отклонения скорости воздуха, выходящего из штабеля пиломатериалов в различных его участках, допускается примерно $\pm 20\%$ от средней его скорости.

На протяжении процесса сушки материала следует поддерживать постоянную скорость воздуха. Если снижение скорости воздуха регулируется, к концу процесса резко возрастет неравномерность просыхания материала по объему штабеля, поэтому установка двухскоростных электродвигателей к вентиляторам сушильных камер с резким изменением скоростей воздуха неоправдана. Правильнее предусматривать периодическое автоматическое выключение вентиляторов в камерах со скоростной циркуляцией при высушивании толстых сортиментов древесины, т. е. применять прерывистые режимы сушки (см. § 39).

Не допускается проектирование сушильных камер длиной, не кратной длине нормального штабеля пиломатериалов ($6,6 + + 0,1 = 6,7$), даже если они временно предназначены для высушивания сортиментов иной длины.

В сушильных цехах небольшой мощности ширину, а также высоту штабеля пиломатериалов можно уменьшить (см. параграф 50).

Рекомендации для проектирования туннелей

Туннельные сушильные установки предназначают преимущественно для массовой сушки нетолстых хвойных пиломатериалов, поэтому предъявляют менее строгие требования к регулированию процесса сушки.

Система сушильных туннелей должна соответствовать требованию проведения в них современных режимов сушки, применяемых в сушильных камерах, с учетом напряжений, развивающихся в древесине в процессе сушки. Рекомендуемый для использования новый по схеме действия сушильный противоточный туннель с зигзагообразной циркуляцией воздуха, позволяющий осуществить двухстадийный режим сушки, изображен на рис. 151. В этом туннеле в зоне I подлежащий сушке материал нагревается, а в зонах II и III протекает первая стадия сушки. В нем установлена отдельно регулируемая система из вентилятора 1 и калорифера 3, нагревающая воздух или газ с параметрами, соответствующими режиму первой стадии сушки.

В зонах IV—VII осуществляется процесс по второй стадии сушки, независимо регулируемый вентилятором 10 и калорифером 9. Перегородка 5 разделяет на две части рециркуляционный

канал. Обработанный воздух удаляется наружу через вытяжную трубу 2, а свежий подается в туннель через заслонку 8. При сушке тонких сортиментов во второй стадии сушки (зоны IV—VII) можно применить прямоточную циркуляцию, поместив заслонку 8 перед вентилятором 10.

Ранее отмечались технико-экономические преимущества прямого использования тепла, получаемого при сжигании топлива, по сравнению с паровым калориферным нагревом сушильного агента. Следует ожидать широкого распространения газовых лесосушильных туннелей вместо паровых.

При калориферном нагревании сушильного агента в туннелях предпочтительнее использовать вместо пара горячую воду (140—160° С). При этом снижаются теплотери и улучшаются

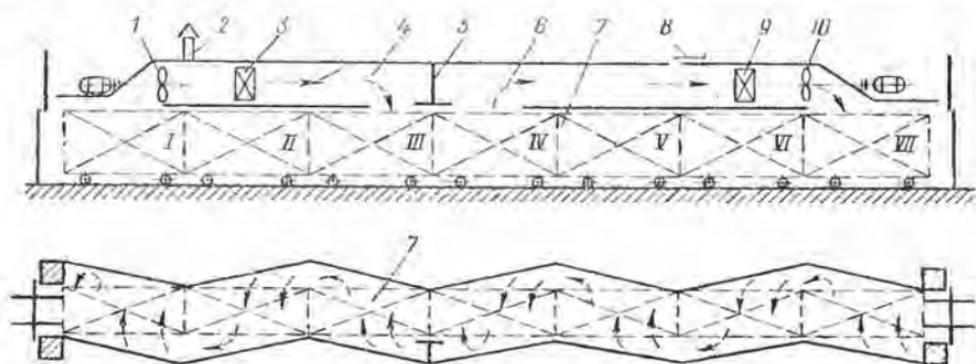


Рис. 151. Сушильный туннель с двухстадийным процессом сушки:

1, 10 — вентиляторы; 2 — вытяжная труба; 3, 9 — калориферы; 4, 6 — рециркуляционные каналы; 5 — перегородка; 7 — высушиваемый материал; 8 — заслонка приточного воздуха; I—VII — сушильные зоны

условия регулирования температуры сушильного агента (увлажнительный пар в туннелях не обязателен).

При проектировании крупных лесосушильных цехов следует учесть, что в них будут эффективными туннели с беспакетными штабелями высотой 3,9 и 5,2 м, вместо применяемых 2,6 м. Удельная стоимость сушильной установки при этом снизится примерно на 20—30%; одновременно уменьшится стоимость сушки, а также сократится покоробленность пиломатериалов.

В проектах сушильных туннелей желательно предусмотреть устройства и механизмы для предотвращения коробления верхних рядов досок в штабеле, что легко достигается их прижатием, в частности применением подвесных грузовых гибких плит (см. 161, 5).

При сушке в разных туннелях пиломатериалов различной толщины, а также настройке процессов сушки в разное время года в противоточные туннели необходимо подавать переменное количество сушильного агента или, что более эффективно,

предусматривать осуществление режимов туннельной сушки с прерывистой циркуляцией воздуха.

Особую заботу проектировщика составляет разработка экранизации штабелей для предотвращения протекания больших количеств сушильного агента мимо материала.

Часто в туннелях приходится высушивать толстые пиломатериалы ответственного назначения, для которых необходима конечная влаготеплообработка. Для этих условий следует предусматривать устройство в общем сушильном блоке дополнительных камер или туннелей кондиционирования, питаемых насыщенным паром низкого давления (см. рис. 106).

96. ВЫБОР СПОСОБА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ (В ДОСКАХ ИЛИ ЗАГОТОВКАХ)

По технологическому потоку обработки древесины на предприятиях сушильный цех — промежуточный между лесопильным и деревообрабатывающим (мебельным, столярным и т. д.). Заготовки для деревообрабатывающего цеха могут быть вырезаны из сырых досок перед сушкой или из сухих — после сушки. В первом случае в сушильных камерах высушиваются заготовки, во втором — доски. Выбор того или иного способа сушки определяет место раскроя досок в технологическом потоке производства, характер буферного склада сушильного цеха, условия погрузки пиломатериалов для сушки и их разгрузки после сушки, а также способ их транспортировки до и после сушки.

Преимущество сушки в досках или в заготовках в значительной степени зависит от характеристики досок; чем ниже сортность древесины и больше топливных отходов получается при ее раскрое, тем выгоднее сушка в заготовках. Однако укладка заготовок для сушки более трудоемка, чем укладка досок. При длительном же высушивании древесины твердолиственных пород, когда стоимость погрузочных работ занимает небольшую долю в общей стоимости сушки, более выгодной может оказаться сушка толстых сортиментов в заготовках (особенно по сравнению с сушкой в необрезных досках).

На выбор того или другого способа сушки влияют размер и разнообразие заготовок: мелкие и различные по сортиментации заготовки трудно укладывать, транспортировать и сортировать; чем дробнее заготовки, тем целесообразнее сушка древесины в досках. На выбор способа сушки влияет также стоимость топлива и пара. Если топливо дешевое, его экономия (из-за снижения расхода пара в камерах) при сушке в заготовках не приводит к значительной эффективности.

Сушка в заготовках явно нецелесообразна при высушивании обрезных пиломатериалов хвойных пород. Существенно, что при раскрое сухих досок на заготовки полезный выход древе-

сиды больше, чем при раскросе влажной древесины с последующей сушкой заготовок. Кроме того, штабелевка древесины при сушке в досках может быть механизирована.

Сравнительная эффективность сушки в досках возрастает по мере удорожания древесины и усовершенствования сушильной техники.

На лесопильных заводах и цехах при дешевом топливе целесообразна массовая сушка древесины в досках, даже необрезных и низкосортных. По мере развития сушильного производства непрерывно снижается число предприятий, на которых древесина твердых пород сушится в заготовках.

97. ВЫБОР СУШИЛЬНЫХ ТУННЕЛЕЙ ИЛИ КАМЕР, ИХ КОЛИЧЕСТВО И ПЛАНИРОВКА

При выборе принципа действия проектируемой сушильной установки (камерный или туннельный процесс) руководствуются тем, что из туннелей сухой материал выгружается через небольшие промежутки времени, что они дешевле по устройству и в эксплуатации и более пригодны для массовой сушки сравнительно однородных не очень толстых пиломатериалов. Однако в них трудно регулировать процесс сушки во времени и качественно высушивать материал с требованиями по II категории с длительностью процесса более 7 сут, а по III категории — более 10 сут.

Сушильные туннели применяют при сушке хвойных пиломатериалов толщиной до 70 мм включительно, если годовая производительность более 15 тыс. м³. При высушивании тонких, например тарных, материалов эта предельная мощность снижается.

В одном блоке должно быть не менее трех туннелей. В виде исключения, если высушиваемый материал однородный и постоянный по номенклатуре (например, стандартная тара), можно устраивать два туннеля.

В паровых сушильных камерах можно успешно высушивать любые сортименты, кроме крупных с сердцевинной, которые во всех случаях будут растрескиваться.

Если в сушильном хозяйстве есть сушильные туннели и камеры, их следует строить в общем блоке с единой транспортной системой.

В новом индустриальном строительстве не допускаются сушильные установки с естественной циркуляцией воздуха.

Сушильные камеры малой мощности (одноштабельные), характеризующиеся большой удельной поверхностью влагопотерь, желательно выполнять изнутри металлическими или предусматривать в них низкотемпературные процессы сушки пиломатериалов.

На лесопильных заводах и лесокомбинатах для массовой сушки хвойных пиломатериалов эффективнее паровые сушильные туннели, если используется отработанный или отборный пар от турбин, газовые сушильные туннели на природном газе или мазуте и газовые туннели на сырых кусковых древесных отходах (дробленке).

На предприятиях или цехах малой мощности перспективен электронагрев с удобной для этого вида энергии автоматизацией процесса (например, применяемый в больших сушильных шкафах; см. рис. 99, а и 126, а), что упростит обслуживание.

В основу расчета количества камер принимают задание на сушку, в котором должны содержаться характеристика материала и условия сушки.

Сначала составляют таблицу продолжительности сушки пиломатериалов для имеющихся сортиментов из задания на сушку (см. табл. 25—28), затем по (262) для намеченного типа сушильных камер (например, обычной тепломощности) находят эквивалентное количество условных U пиломатериалов (коэффициент K берут из табл. 30).

Например, для $\Phi_{1T_1}/K_1=5000 \cdot 200/0,530$ и $\Phi_{2T_2}/K_2=9000 \cdot 100/0,484$ получим $U_1=0,004\Phi_{1T_1}/K_1=7550$ м³/г, $U_2=0,004\Phi_{2T_2}/K_2=7450$ м³/г. Итого $U=15\,000$ м³/г.

Значения производительности сушильных камер и туннелей в соотношениях (252)—(261) даны в виде $U-P\Gamma$, где Γ — габаритный объем штабелей в камере; для одного типового штабеля $\Gamma=6,6 \cdot 1,8 \cdot 2,6=31$ м³, а для двух — 62 м³. Поэтому производительность двухштабельной камеры обычной тепломощности $U=28,5\Gamma=28,5 \cdot 62=1770$ м³/г или ≈ 900 м³ на 1 штабель. Следовательно, для высушивания указанного выше материала потребуется $15\,000/1770=8,5$ камер. Принимаем 9.

Число камер в блоке должно обеспечивать гибкую работу сушильного цеха. Так, в столярно-мебельном производстве должно быть не менее 8—10 камер и лишь на небольших предприятиях — около 5 шт. Однако устройство в одном блоке более 15 и, как предел, 20 камер не рекомендуется, так как удорожается их строительство и усложняется эксплуатация. В таких условиях применяют четырехштабельные камеры или туннели.

При планировке сушильного цеха прежде всего учитывают удобство погрузки и транспортировки пиломатериалов, поэтому сушильный цех на генеральном плане предприятия должен быть привязан к сортировочной площадке лесопильного цеха и к складу пиломатериалов.

Погрузку сырых пиломатериалов для сушки целесообразно проводить у сортплощадки лесопильного цеха, а разгрузку сухих — путем непосредственной подачи охладившихся досок в деревообрабатывающие станки со штабеля, устанавливаемого на лифте (подъемнике).

Планировку сушильного цеха выполняют по различным схемам; основные из них приведены на рис. 132. Применяют схемы как с рельсовым, так и с безрельсовым транспортом.

Наиболее простой сушильный цех состоит из двух-трех небольших камер, с одного конца которых расположена погрузочная площадка, а с другого — коридор управления. Материал для укладки подают к камерам по рельсовым путям, тельфером, автопогрузчиком или иным путем и формируют в сушильный штабель, перемещаемый затем лебедкой через блоки в камеру. Применяют также траверсную тележку (см. рис. 132, а).

На рис. 132, б изображена типичная планировка сушильного цеха, состоящего из ряда камер и склада с проходящим посередине траверсным путем. Здесь необходим погрузочный лифт. На рис. 132, в дана схема планировки цеха из сушильных туннелей; рядом с ними проложен обгонный рельсовый путь для возврата прокладок, трекров и вагонеток.

Блок из шестиштабельных сушильных туннелей с зигзагообразной циркуляцией воздуха показан на рис. 132, г, а из туннелей с поперечной загрузкой штабелей — на рис. 132, д. Для сушильных установок на продуктах сгорания планировки показаны на рис. 97 и 105.

Возможны и другие схемы планировки лесосушильных цехов.

Площадь рельсового склада сухих пиломатериалов составляет 0,4—0,6 площади камер (меньше для крупного хозяйства, оборудованного мостовым краном). Шаг рельсовых путей на складе 2 м и 2,5 м.

98. ТЕПЛОВЫЙ РАСЧЕТ ПАРОВЫХ СУШИЛЬНЫХ КАМЕР

Основные положения

Тепловой расчет выполняют для определения потребности тепла на сушку материала, а также необходимой мощности теплового и аэродинамического оборудования.

Сушильные камеры и туннели рассчитывают неодинаково. В камерах количество испаряемой из материала влаги уменьшается со временем, поэтому расчеты проводят не по среднему, а по начальному, наибольшему, часовому количеству испаряемой влаги. Коэффициент неравномерности испарения влаги из материала принимают 1,2.

При тепловом расчете сушильного туннеля теплотери относят к 1 кг циркулирующего воздуха, снижая этим расчетную величину $d_2 - d_1$ (см. рис. 12, в, линия 1—2) или, что удобнее, компенсируют теплотери добавочным количеством воздуха с учетом его теплоемкости.

Разница в расчете сушильной камеры и туннеля заключается в том, что теплотеря на нагревание материала в камерах учитывается отдельным (начальным) периодом прогрева, когда процесс сушки еще не начинался; в сушильных туннелях прогрев идет одновременно с сушкой материала в других штабелях и поэтому должен быть компенсирован дополнительным количеством воздуха.

Ранее указывалось, что в сушильных противоточных туннелях количество, а следовательно, и скорость воздуха по материалу, тесно связаны с количеством испаряемой из материала влаги (в зависимости от длины туннеля, толщины материала и др.), в то время как в камерном процессе сушки скорость воздуха не обусловлена жестко этим технологическим признаком: она может быть значительно больше или даже меньше скорости воздуха, необходимой в туннеле с аналогичным материалом и режимом сушки.

Расчетные формулы, параметры и коэффициенты

Рассмотрим основные расчетные параметры камерного процесса сушки с побудительной циркуляцией воздуха для сушки сосновых пиломатериалов толщиной 25 мм. Порядковый номер расчета см. табл. 31.

1—5. Вначале выявляется потребное количество камер для выполнения программы по сушке (см. § 97, 98).

6. Количество влаги, испаряемой из 1 м³ высушиваемой древесины (112), кг/м³:

$$M = \rho_y (w_n - w_k) / 100,$$

где ρ_y — условная плотность древесины (см. табл. 6), для сосны 400 кг/м³.

7. Вместимость камеры определяют произведением габаритного объема штабелей Γ на объемный коэффициент K заполнения их материалом [см. (250)], м³:

$$B = \Gamma K = \Gamma (0,85 \cdot K_{шт} T) / (25 + 1,08 T),$$

где T — толщина материала, мм.

8. Количество влаги, испаряемой в камере в течение сушки, кг:

$$G = MB. \quad (281)$$

9. Часовое количество влаги, испаряемой в камере из материала, кг:

$$D_0 = MB / \tau. \quad (282)$$

10. Количество воздуха, необходимом для испарения влаги из материала в течение часа (42), кг/ч:

$$L = 1000D_0/(d_2 - d_1). \quad (283)$$

11. Расчетную величину $d_2 - d_1$ принимают в камерах в среднем около 0,5—1 г на 1 кг проходящего через штабель воздуха, а в туннелях — около 10 г/кг. При этом расчетный перепад температур $t_1 - t_2$ (°С) воздуха в штабеле определяют приближенно по Id -диаграмме. Чтобы при расчете камер получить большую точность отсчета, принимают точки для удесятенной величины $d_2 - d_1$ и затем найденное значение $10(t_1 - t_2)$ уменьшают также в 10 раз или для адиабатного процесса находят более точно по уравнению

$$t_1 - t_2 = (d_2 - d_1) / [0,40 + 0,00037 (d_2 + d_1)]. \quad (284)$$

Относительно $d_2 - d_1$ (г/кг воздуха) это уравнение примет вид: $d_2 - d_1 = (t_1 - t_2) (0,40 + 0,00074 d_1)$.

12—15. Объем этого количества воздуха, м³/ч,

$$V = LV_{1+0,001d}, \quad (285)$$

где $V_{1+0,001d}$ — удельный объем воздуха, отнесенный к 1 кг абсолютно сухой его части [см. (28) и рис. 7].

16—18. Расчетная скорость воздуха перед штабелем, м/с

$$v = V/lhz, \quad (286)$$

где l — длина штабелей материала в камере (нормально 6,6 м); h — высота штабеля до сушки, принимаемая обычно 2,7 м; z — коэффициент перетекания воздуха мимо штабеля (при хорошей экранизации примерно 1,5). Скорость в штабеле при толщине материала 25 мм принимают в 2 раза больше, т. е. $2v$, но не менее 3 м/с.

19. Расход тепла на нагревание воздуха, испаряющего 1 кг свободной влаги с температурой, равной t_d высушиваемой древесины близкой к t_2 отработанного воздуха, составит q (кДж/кг или ккал/кг) [см. (41)], а за вычетом теплоты на нагрев влаги до t_2

$$q_1 = 1000 \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} - 4,19t_2 \quad (\text{здесь } I_2 \text{ и } I_0 \text{ в кДж/кг}), \quad (287)$$

$$[\text{или } q_1 = 1000 \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_1} - t_2 \quad (\text{здесь } I_2 \text{ и } I_0 \text{ в ккал/кг})].$$

В туннельном процессе сушки температуру испаряемой влаги принимают равной положительной температуре загружаемого материала или из-за небольшой ее величины не учитывают. Тогда расчет q_1 ведут по (41), а при отрицательной темпе-

ратуре древесины теплоту нагревания до 0°C вместе с теплотой плавления льда добавляют к значению q_1 .

20. Расход тепла q_2 на нагревание 1 кг влажной древесины от начальной температуры t_0 до t_1 определяют расчетом [60] или графически (см. рис. 56) с учетом температуры t_0 древесины в зимнее время.

Потребное количество тепла для нагревания загруженной в камеру древесины в объеме V м³ составит, кДж на камеру, если q_2 в килоджоулях, или ккал на камеру:

$$Q_m = \rho V q_2. \quad (288)$$

Значения ρ , кг/м³, приведены на диаграмме рис. 45. Потеря тепла с нагретым высушенным материалом q_2 , выгруженным из камеры, определится по диаграмме рис. 56, эта потеря на 1 кг испаряемой влаги составит:

$$q_2 = \rho V q_m / D_0, \quad (289)$$

где q_m — количество тепла, выделяющегося при охлаждении 1 кг высушенной древесины от t_1 до t_0 окружающего воздуха (около 20°C).

Потери тепла через ограждения камеры определяют по формуле

$$Q_s = K' (t_1 - t_0) F (\text{Вт}) = K (t_1 - t_0) F (\text{ккал/ч}).$$

Теплопотери для крайней камеры выявляют по ее строительным элементам.

Расчетные зимние температуры t_0 (отрицательные) наружного воздуха для проектирования отопления принимают следующие: Актюбинск — 29; Архангельск — 32; Баку — 3; Батуми — 0; Брянск — 23; Витебск — 23; Верхоянск — 63; Владивосток — 24; Волгоград — 25; Воронеж — 25; Горький — 28; Днепропетровск — 21; Ереван — 18; Иркутск — 35; Казань — 29; Калинин — 25; Калининград — 18; Киев — 21; Киров — 31; Кострома — 28; Краснодар — 17; Красноярск — 37; Ленинград — 24; Львов — 16; Минск — 22; Москва — 26; Новороссийск — 12; Новосибирск — 39; Одесса — 15; Омск — 36; Пермь — 31; Петрозаводск — 26; Рига — 19; Ростов-на-Дону — 22; Саратов — 28; Свердловск — 32; Тбилиси — 7; Томск — 39; Тюмень — 33; Уфа — 31; Хабаровск — 33; Чита — 38; Якутск — 56.

Коэффициент теплопередачи однослойной стены рассчитывают по (218):

$$\begin{aligned} K' &= 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})] = \\ &= 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) [\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})]. \end{aligned}$$

Величина коэффициента теплоотдачи для внутренней поверхности стены в среднем $\alpha_1=14$, для наружной $\alpha_2=23$, для перекрытия в пределах чердачного помещения 11,6 Вт/(м²·К) [соответственно 12; 20 и 10 ккал/(м²·ч·°С)].

Коэффициенты теплопроводности λ основных материалов во влажных условиях эксплуатации, Вт/(м²·К) [ккал/(м²·ч·°С)]: для древесины хвойных пород 0,174 [0,15], кирпичной кладки 0,81 [0,7], бетона 1,86 [1,6], железобетона 2,0 [1,75], плит древесностружечных 0,16 [0,14], штукатурки 2,1 [1,8], плит теплоизоляционных 0,12 [0,10].

Значения коэффициентов теплопередачи K элементов ограждений в приближенных расчетах наружных кирпичных стен принимают 1,0 [0,9]; перекрытий, утепленных слоем шлака 250 мм — 0,7 [0,6]; пола 0,5 [0,4]; двери 4,7 [4,0] Вт/(м²·К) [ккал/(м²·ч·°С)].

Ограждения сушильных камер более влажны, чем обычные строения; кроме того, много тепла теряется через их поры и видимые неплотности. Поэтому величину теплотерь в расчетном итоге учитывают коэффициентом $C=1,5$. Потери тепла через ограждения относят к 1 кг испаряемой из материала влаги:

$$q_5 = Q_5/D_0. \quad (290)$$

Общая потребность тепла на 1 кг испаряемой влаги суммируется $q=q_1+q_2+q_5$.

21—25. Потребность тепла на камеру в час с добавкой 15% к q_1 на неучтенные потери $Q_k=(1,15q_1+q_2+q_5)D_0$.

26. Поверхность нагрева калорифера, м²

$$F_k = Q_k C_1 / [K(t_n - t_{cp})], \quad (291)$$

где k — коэффициент теплопередачи калорифера [см. (220)—(224) и др.]; t_n — температура насыщенного пара [в зимнее время обычно 133—144°С при абсолютном давлении 0,3—0,4 МПа (3—4 бар)]; t_{cp} — средняя температура воздуха до и после калорифера, °С; C_1 — коэффициент на неравномерность нагрева калорифера (принимают 1,1).

Число калориферов (ребристых труб или пластинчатых), шт., $n=F_k/f_k$, где f_k — площадь поверхности нагрева единичного калорифера.

При настенном монтаже ребристых труб устанавливают по высоте от 6 до 10 их рядов на каждой продольной стене камеры, т. е. площадь поверхности нагрева на длине 12 м равна 288—480 м². Схема монтажа калорифера показана на рис. 152.

27. Зимняя потребность в сухом насыщенном паре, считая его теплоотдачу 2100 кДж/кг (500 ккал/кг), кг/ч на камеру

$$D_1 = Q_k' / 2100 = Q_k / 500. \quad (292)$$

28. Зимняя потребность в сухом насыщенном паре с добавкой 10% на промежуточные увлажнения и конечную влаготеплообработку материала

$$D_2 = 1,1Q'_k/2100 = 1,1Q_k/500 \text{ (кг/ч на камеру).}$$

29. Диаметр паромангалитры определяют по формуле, мм

$$d_{\text{манг}} = 18,8 \sqrt{mD_2/\rho_n v_n}, \quad (293)$$

где m — количество одновременно работающих камер; ρ_n — плотность пара, зависящая от его давления в паропроводе (см. табл. 1); v_n — скорость пара в трубах, принимаемая для паро-

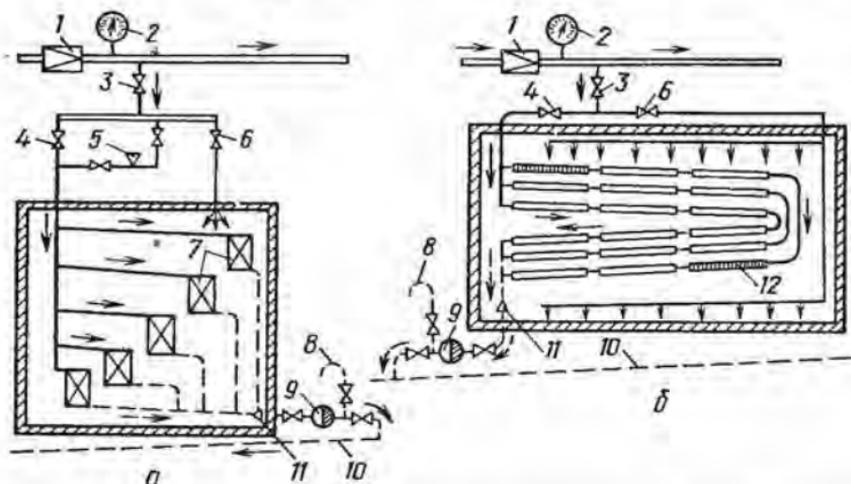


Рис. 152. Схемы подвода пара, монтажа калориферов и отвода конденсата: а — с пластинчатыми калориферами; б — с ребристыми трубами; 1 — редукционный клапан на паромангалитре; 2 — манометр; 3 — паропусковой клапан камеры; 4 — ручной клапан подачи пара в калорифер; 5 — автоматический регулятор подачи пара в калорифер; 6 — клапан увлажнительного пара; 7 — пластинчатые калориферы; 8 — контрольные трубки конденсатоотводчика; 9 — конденсатоотводчики; 10 — конденсатная магистраль; 11 — обратные клапаны; 12 — ребристая труба

магистральной 70 м/с, для паропроводов, отходящих к двухштабельным камерам, 60 м/с, а к одноштабельным 50 м/с; D_2 — часовое количество пара, протекающего по трубе.

30. Диаметр трубы, подводящей пар к камере, определяют по (293) при $m=1$.

31. По этой же формуле рассчитывают диаметр конденсатных труб. Плотность воды ρ_v с температурой близкой к 100°С принимают 960 кг/м³, скорость воды в магистральной 1—2 м/с, а в отводных трубах 0,5—1 м/с (меньшая скорость — для малых цехов).

Конденсатоотводчик устанавливают один на камеру и рассчитывают по количеству поступающего в калорифер пара (см.

параграф 59). Монтаж калориферов выполняют с учетом схем на рис. 152. Всем трубам придают непрерывный уклон 0,005—0,01 по ходу пара и конденсата. Обводных труб у конденсаторо-отводчика не ставят, применяют контрольную трубку.

99. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СУШИЛЬНЫХ КАМЕР

Аэродинамическим расчетом определяют скорости воздуха и аэродинамические сопротивления в системе сушильной камеры, включая ее каналы. Расчет ведут с целью подбора сечений каналов и проходов для воздуха, установления характеристики вентиляторов и электродвигателей. Рассмотрим схему аэродинамического расчета применительно к камере СПВ-64 со скоростной циркуляцией воздуха по материалу (см. рис. 92, ж).

Учет аэродинамических сопротивлений

Давление воздуха H_v (Па или мм вод. ст.), создаваемое вентилятором, должно быть не менее суммы сопротивлений всех последовательных участков его замкнутой сети:

$$H_v = \Sigma \frac{\rho v^2}{2} \left(\lambda \frac{l}{d} + \xi \right), \quad (294)$$

$$\left[\text{или } H_v = \Sigma \frac{\rho v^2}{2g} \left(\lambda \frac{l}{d} + \xi \right) \right].$$

Для незамкнутой сети, например в условиях расчета воздухопроводов эжекционных камер, к сопротивлению сети вентилятора нужно добавить динамическое давление H_d (Па или мм вод. ст.) выходящего из этой сети воздуха (например, из сопел):

$$H_d = \rho v^2 / 2, \quad (295)$$

$$\left(\text{или } H_d = \rho v^2 / 2g \right).$$

Сечение воздухопроводов устанавливают, исходя из экономической скорости $v_{\text{эк}}$ воздуха в них. При повышенной температуре экономичная скорость увеличивается. Чем меньше сечение воздухопровода или газохода и более шероховаты его стенки, тем ниже устанавливают скорости в них воздуха или газа. Эти скорости принимают (м/с): в эжектирующих соплах 40—50 (800—1200) [80—120], в воздухопроводах вентилятора 12—16 (80—100) [8—10], в газоходах топки и ее дымовой трубы 4—8 (3—10) [0,3—1,0], в калорифере боровных камер 3—4 (1—3) [0,1—0,3], в штабеле пиломатериалов 2—5 (2—12) [0,2—1,2], в проходах с боков штабеля до 4—8 (8—32) [0,8—3,2]. В скобках приведено для потока соответствующее динамическое давление в Па, а в квадратных скобках — в мм вод. ст.

Сопrotивление штабеля шириной 1,8 м прохождению воздушного потока, движущегося вдоль прокладок, между рядов тонких пиломатериалов, примерно 2,7, а толстых — около 3 динамических давлений (по скорости между досок). Величина сопротивления 5—10 Па (0,5—1 мм вод. ст.) (см. рис. 75, н).

В противоточных сушильных туннелях, характеризующихся продольной укладкой пиломатериалов со шпациями, в каждом штабеле теряется давление воздушного потока около 10 Па (1 мм вод. ст.), т. е. по длине туннеля с пятью штабелями оно составляет 50 Па (5 мм вод. ст.— эта размерность удобна при измерении давлений широко применяемыми жидкостными манометрами, см. рис. 123).

В туннелях с зигзагообразной циркуляцией сушильного агента, где пиломатериалы укладывают без шпаций, потеря давления в каждом штабеле, по опытным данным, около 20 Па (2 мм вод. ст.). Таким образом, аэродинамическое сопротивление материала в семиштабельном туннеле около 140 Па (14 мм вод. ст.).

В пятиштабельных (по длине) туннелях «Некар», реконструированных по схеме ВНИИДМАШа на зигзагообразную циркуляцию, замеренная потеря давления в пяти штабелях 80—100 Па (8—10 мм вод. ст.).

Аэродинамическое сопротивление полугазовой толки на древесных отходах (см. рис. 108, а), работающей с полной нагрузкой, доходит до 60 Па (6 мм вод. ст.).

Последовательность аэродинамического расчета сушильных камер

Вследствие небольшой протяженности каналов в сушильных камерах (здесь не рассматриваются рециркуляционные каналы в случае расчета сушильных туннелей) первое слагаемое в (294), показывающее трение воздуха о стенки каналов, не учитывается ($\lambda d/l \rightarrow 0$). Таким образом, рассмотрены только сопротивление материала и местные сопротивления воздушного потока, определяемые по уравнению

$$H_{\text{тр}} = \rho v^2 \xi / 2 \text{ (Па)},$$

$$\text{[или } H_{\text{тр}} = \rho v^2 \xi / 2g \text{ (мм вод. ст.)].}$$
(296)

Для расчета сопротивлений строят аэродинамическую схему выбранной для проектирования сушильной камеры и на ней отмечают цифрами характерные участки с местными сопротивлениями, как это показано на рис. 153. Сопротивления условно принимают симметричными относительно средней вертикальной плоскости камеры, поэтому участки 1+9, 2+8 и др. можно в расчетах попарно объединять.

Расчет сводят в таблицу, при заполнении которой предусматривают постоянство плотности ρ (кг/м³) и объема V (м³/с) воздуха по пути циркуляционного кольца. Коэффициенты местных сопротивлений приведены в § 43. Основные сопротивления — штабель материала, повороты потока воздуха, внезапные его сужения и расширения, а также диффузорные переходы.

Если в нормальный штабель пиломатериалов подается более 28 м³/с воздуха, расчет сопротивлений при верхнем воздухораспределении ведут для верхней части штабеля, над уровнем $\frac{3}{4}$ его высоты. В нижней части штабеля скорость воздуха (по схемам, аналогичным приведенной на рис. 153) выше средней его скорости по материалу. Возможно, потребуется даже установка тормозящих приспособлений (см. рис. 80). Настенные ребристые трубы также оказывают положительное тормозящее воздействие на выравнивание распределения потока воздуха по высоте штабеля.

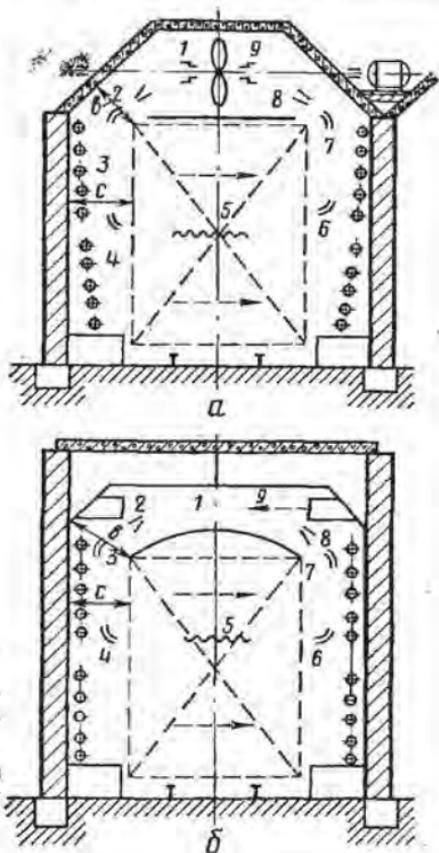


Рис. 153. Схемы разметки местных сопротивлений на поперечных разрезах лесосушильных камер:

а — камера с поперечными валами; б — камера эжекционно-реверсивная; 1—9 — характерные участки

Аэродинамический расчет эжекционных камер

С учетом накопленного промышленного опыта предварительно рассчитывают эжекционные камеры по обобщенным узловым параметрам. Определяют сопротивление Σh для сушильного агента, циркулирующего по замкнутому кольцу (см. рис. 153, б), и устанавливают коэффициент противодействия A :

$$A = \Sigma h / h_3, \quad (297)$$

где Σh — суммарное сопротивление циркуляционного кольца камеры; h_3 — динамическое давление струи, выходящей из сопла.

Затем по опытным данным аналогичных систем задаются коэффициентом объемной кратности эжекции m , т. е. отношением объема воздуха после эжекции V_1 к объему эжектирующего воздуха V_3 , вытекающего из сопел.

Величина m в эжекторе со щелевыми соплами или коническими двойными с горизонтальными осями (см. рис. 153, б), размещенными с шагом 500 мм, 3—5. При одном штабеле, продуваемом воздухом, кратность эжекции можно принять 4. Кратность эжекции удобно определять в газовых сушильных установках замером температур, поскольку эжектирующий газ в количестве V_3 обычно более нагрет, чем эжектируемый. Тогда с учетом количества V_2 эжектируемого газа при постоянной его теплоемкости получим

$$m \approx \frac{V_1}{V_3} = \frac{V_2}{V_3} + 1 = \frac{d_2 - d_3}{d_2 - d_1} = \frac{t_3 - t_2}{t_1 - t_2}, \quad (298)$$

где значения индексов при температурах t и влагосодержаниях d воздуха те же, что и при их количестве.

Сечение камеры смешения эжектора, перпендикулярное потоку воздуха, определяют из суммы сечений выходных отверстий сопел Σf , умноженной на коэффициент B , который может быть установлен в зависимости от величины A и кратности эжекции m . Эта зависимость для сопел круглого сечения, эжектирующих неподвижный воздух, представляется в таком виде [42].

Величина A	0,034	0,068	0,051	0,043	0,035	0,029	0,025
Кратность эжекции m	2,5	3,0	3,6	4,0	4,6	5,3	5,8
Коэффициент B	10	15	20	25	30	35	40

Для сопел, расположенных в ряду перпендикулярно длине камеры смешения, при перемещении попутно движущегося эжектируемого воздуха кратность эжекции в 1,2 раза больше приведенной. Таким образом, при величине A , равной 0,040, и кратности эжекции 5 коэффициент B будет около 26; этот коэффициент показывает отношение площади камеры смешения эжектора к площади отверстий сопел.

После этого определяют скорость истечения газа из сопел, площадь их выходных отверстий, мощность струй, шаг сопел, размеры камеры смешения эжектора и мощность вентилятора.

Пример. Рассмотрим ориентировочный расчет эжекции в паровой двухштабеляной сушильной камере длиной 14 м.

Допустим, по тепловому и аэродинамическому расчетам получено $V=200\,000$ м³/ч, или 55,5 м³/с воздуха, циркулирующего по штабелю материала толщиной 25 мм, плотность воздуха $\rho=0,83$ кг/м³ (при температуре 89° С и $\varphi=0,5$; см. рис. 7).

Отдельным расчетом установлено, что сопротивление движению воздуха по всему циркуляционному кольцу камеры равно $\Sigma h = 34$ Па (3,4 мм вод. ст.). Находим динамическое давление эжектирующей струи [см. (297)]: $h_3 = -34/0,04 = 850$ Па или $3,4/0,04 = 85$ мм вод. ст.

Скорость истечения воздуха из сопел [см. (206)]: $v_3 = 1,41 \cdot \sqrt{850/0,83}$ или $4,43 \sqrt{85/0,83} = 45$ м/с.

Объем воздуха из сопел $V_3 = 1,5V/m = 1,5 \cdot 55,5/5,0 = 16,6$ м³/с, или 60 000 м³/ч, где 1,5 — коэффициент запаса на перетекание воздуха мимо материала.

Площадь отверстий всех сопел в их ряду $\Sigma f = V_3/v_3 = 16,6/45 = 0,37$ м², или 37 дм².

При выходном сечении выбранного сопла $0,55 \times 3 = 1,65$ дм² число сопел n , монтируемых на нагнетательном канале, $n = \Sigma f/1,65 = 37/1,65 = 23$.

Крайнее сопло в их ряду расположено обычно на расстоянии 1,5 м от торцевой стены (здесь устанавливают вертикальные экраны шириной 0,5 м с боков торца штабеля); тогда длина ряда сопел по длине камеры составит $14 - (2 \cdot 1,5) = 11$ м. Шаг сопел $11/(23 - 1) = 0,5$ м, или 500 мм.

Сечение камеры смешения эжектора, перпендикулярное потоку воздуха, $B\Sigma f = 26 \cdot 0,37 = 9,6$ м², а ее высота $9,6/(14 - 1) = 0,73$ м (принимаем 0,7 м). Средняя скорость воздуха в камере смешения длиной 13 м будет $v_1 = -1,5 \cdot 55,5/(13 \cdot 0,7) = 9$ м/с, а динамическое давление $h_d = 0,83 \cdot 9 \cdot 9/2 = 34$ Па или $0,83 \cdot 9 \cdot 9/19,6 = 3,4$ мм вод. ст. Мощность струй, вытекающих в объеме V_3 [см. (205)], $N_e = 16,6 \cdot 850/1000$ или $16,6 \cdot 85/102 = 13,8$ кВт.

Затем в обычном порядке с учетом (294) рассчитывают вентиляционную систему. Мощность, потребляемая вентилятором, не должна быть больше чем в 1,5 раза мощности всех эжектирующих струй N_e . Последнюю легко определить опытным путем по известному суммарному сечению отверстий в соплах Σf и легко замеряемому динамическому давлению h_3 потока, вытекающего из них воздуха. Потребная мощность электродвигателя $13,8 \cdot 1,5 \cdot 1,05 = 21,7$ кВт.

Характеристики трехфазных, асинхронных, короткозамкнутых, защищенных электродвигателей серии 4А (по ГОСТ 19523—74) приведены далее:

При $n = 1500$															
об/мин, кВт	1,1	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11	15	22	30	37	45		
При $n = 1000$															
об/мин, кВт	0,75	1,1	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11	15	18	22	30		
Масса, кг	19	22	31	38	44	60	84	100	140	165	185	205	285		

Трение воздуха, движущегося по длине распределительного канала несущего сопла, компенсируется превращением части динамического давления в статическое при замедлении скорости (расходуемого) воздуха и поэтому отдельно не учитывается [см. (207)]. Рассматриваются лишь местные сопротивления на начальном участке этого канала до третьего сопла.

100. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТОВ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Удельный расход пара D (кг) на 1 кг испаряемой из материала влаги определяют в среднем по эмпирической формуле (269).

Расход пара D_m на высушивание 1 м³ пиломатериалов составит MD (112) и (269), т. е.

$$D_m = \rho \frac{w_n - w_k}{100} [1,5 + a(t_1 - t_0)\tau]. \quad (299)$$

Например, при $\rho=400$ кг/м³, $w_n - w_k = 50\%$, $t_1 - t_0 = 100^\circ\text{C}$ и $\tau=5$ сут, получим

$$D_m = 400 \frac{50}{100} (1,5 + 0,003 \cdot 100 \cdot 5) = 600 \text{ кг/м}^3.$$

Удельный расход вентиляторами энергии \mathcal{E} на высушивание 1 м³ пиломатериалов составит

$$\mathcal{E} = 24\tau N/B, \quad (300)$$

где N — мощность одновременно работающих электродвигателей камеры, кВт; B — вместимость камеры, м³.

Так, при $N=20$ кВт, $B=30$ м³ и $\tau=5$ сут, $\mathcal{E}=24 \cdot 5 \cdot 20/30=80$ кВт·ч/м³.

Площадь поверхности нагрева ребристых труб F принимают 5—8 м² на 1 м³ габаритного объема Γ штабелей, т. е. $F=5 \dots 8 \Gamma$ м²/м³ (больше для тонких пиломатериалов мягких пород).

В табл. 31 изложена последовательность расчетов с численным примером для сушки сосновых досок толщиной 25 мм по второй качественной категории, со ссылками на формулы (в скобках), таблицы (т) и предыдущие пункты расчета (п), с указанием расчетных действий.

101. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Особенности расчета боровных и газовых сушильных установок

К особенностям конструирования и строительства небольших боровных камер относятся строгие требования по тщательной их герметизации. Высокое влагосодержание среды может быть достигнуто за счет влаги, выделяющейся из высушиваемой древесины.

Применительно к бескалориферным газовым сушильным установкам методика тепловых расчетов в графоаналитической форме изложена при рассмотрении Ida -диаграммы (см. § 16).

31. Последовательность и содержание расчетов сушильной камеры

Элементы расчета	№ пунктов, п. расчета, формул, () и таблиц, т	Значения для $T=25$ мм
<i>Потребное количество камер</i>		
1. Внутренние размеры камеры (длина, ширина, общая высота) $L, B, H, м$	т 15, 16	14,0·3,1·4,5
2. Габаритный объем двух штабелей $2lbh, м^3$	т 14	$Г=2·6,6·1,8×$ $×2,6=61,6$
3. Годовая производительность камеры в условном исчислении $У=28,5 Г, м^3/год$	(256)·п 2	1770
4. Потребное количество n камер на программу 15000 $м^3/год$		8,5 (принимаем 9)
<i>Количество влаги и воздуха</i>		
5. Начальная и конечная влажность древесины W_n и $W_k, \%$	—	70 и 7
6. Испаряется влага на 1 $м^3$ сосновой древесины $M, кг/м^3$	(112)	252
7. Вместимость камер $B=0,367 Г, м^3$	п 2·(246)	22,6
8. Продолжительность сушки материала $\tau, ч$	т 24—27	72
9. Испаряется влаги в среднем за 1 ч $B M/\tau, кг/ч$	п 6·п 7/п 8	79,2
10. То же с коэффициентом 1,2 на неравномерность сушки $1,2 BM/\tau, кг/ч$	1, 2 п 9	95,0
11. Приращение влагосодержания воздуха в штабеле $d_2-d_1, г/кг$	Id -диаграмма	1,0
12. Потребно воздуха на испарение 1 кг влаги $I, кг/кг$	(42)	1000
13. Необходимое количество воздуха на камеру в час $L, кг/ч$	п 10·п 12	95 000
14. Необходимый объем воздуха $V, м^3/ч (м^3/с)$	(по рис. 7) п. 13	133 000 (37)
15. Площадь живого сечения двух штабелей $f (l—длина, h—высота штабеля), м^2$	$0,5lh·2$	18,5
16. Скорость воздуха в штабеле $v, м^3/с$	(199)	2,0
17. Принимается для расчета вентиляторов количество воздуха $1,5V, м^3/ч (м^3/с)$	1,5·п 14	200 000 (56)
18. Расчетный воздухообмен камеры (металлической, при нормальном режиме сушки) $V_0, м^3/ч (м^3/с)$	п 10·(40)	360 (0,1)

Элементы расчета	№ пунктов, п, расчета, формул, () и таблиц, т	Значения для $T=25$ мм
<i>Калориферы и трубы</i>		
19. Расход тепла на испарение 1 кг влаги q_1 , кДж/кг (ккал/кг)	(287)	2 850 (680)
20. Теплопотери (зимой) на 1 кг влаги (по отдельному расчету) q_2+q_3 , кДж/кг (ккал/кг)	(289) + (290)	840 (200)
21. Общий расход тепла на 1 кг влаги с добавкой 15% (от п 19) на неучтенные теплопотери $1,5q_1+q_2+q_3$, кДж/кг (ккал/кг)	1,15 · п 19 + п 20	4 100 (980)
22. Расход тепла на камеру в час Q , кДж/кг (ккал/кг)	п 21 · п 10	390 000 (93 000)
23. Разность температур внутри и вне калорифера t_n-t_w , °С	т 1	132—85
24. Массовая скорость воздуха по калориферу vr , кг/м ² с		3,0 · 0,87 = 2,6
25. Коэффициент теплопередачи ребристых труб k , Вт/(м ² ·к) [ккал/(м ² ·ч·°С)]	(222)	10,0 · 1,16 = 11,6 [(13+7)/2 = 10,0]
26. Площадь поверхности нагрева парового калорифера ($c=1,2$) F , м ²	(219)	238
27. Расход пара в калорифере на камеру в час (теплоотдача 1 кг пара 2100 кДж/кг или 500 ккал/кг) D_k , кг/ч	п 22/2100 п 22/500	186 186
28. То же с добавлением 10% на влаготеплообработку 1,1 D_k , кг/ч	—	205
29. Диаметр паромангалитрали (с учетом числа камер n) d , мм	п 28 · п · (293)	94 (100)
30. Диаметр труб к камерам d , мм	п 28 н (293)	50
31. Диаметр конденсатной магистрали d , мм	п 27 н (293)	32
<i>Вентиляторный узел</i>		
32. Аэродинамическое сопротивление циркуляционного кольца, включая вентилятор (по отдельному расчету, см. рис. 153) H , Па (мм вод. ст.)	(204)	140 (14)
33. Мощность вентилятора на камеру (при КПД реверсивных вентиляторов $\eta=0,5$) N , кВт	(205)/0,5	20
34. При установке шести вентиляторов У12 — № 12,5 мощность каждого электродвигателя N , кВт	—	4

Элементы расчета	№ пунктов, п. расчета, формул, () и таблиц, т	Значения для $T=25$ мм
35. Частота вращения вентилятора n , об/мин	рис. 117	900
36. Для одноштабельной камеры выбирается вентилятор У12—№ 20 с частотой вращения $n \approx 550$ об/мин N , кВт	рис. 92, в и 161, е, ж	13
37. Для одноштабельной камеры при сушке хвойных пиломатериалов толщиной более 35 мм или твердых лиственных пород применим вентилятор № 16 ($n \approx 700$ об/мин) N , кВт	рис. 92 и 154, в, г	7,5—10
<i>Расчетные технико-экономические показатели (укрупненные)</i>		
38. Удельный расход пара на 1 кг испаряемой влаги (зимой) $D_{уд}$, кг/кг	п 28/п 9	2,58
39. Расход пара на высушивание 1 м ³ пиломатериалов D_p , кг/м ³	п 38/п 6	545
40. Стоимость пара на сушку 1 м ³ пиломатериалов при цене тонны пара 3—4 р/т P_c , р/м ³	$P_c \cdot п 39$	3,5·0,545=1,91
41. Расход энергии на сушку 1 м ³ пиломатериалов \mathcal{E} , кВт·ч/м ³	$\frac{п 33-п 8}{п 7}$	63
42. Стоимость энергии на сушку 1 м ³ пиломатериалов при цене 1 кВт·ч 1,5 коп \mathcal{E}_c , коп/м ³	п 41	1,5·63=95
43. Стоимость пара и энергии на сушку 1 м ³ пиломатериалов $P_c + \mathcal{E}_c$, р/м ³	п 40+п 42	2,86
44. Ориентировочная стоимость сушки, считая от нее энергетические затраты, равными 0,6, р/м ³	п 43/0,6	4,77
45. Площадь поверхности нагрева калорифера на 1 м ³ объема Γ штабелей F/Γ , м ² /м ³	п 26/п 2	4,7
46. Аэродинамический КПД сушильной камеры (отношение сопротивления штабеля при $v=2$ м/с ко всему сопротивлению камеры) η_a	по рис. 75, н/п 32	0,9/14=0,06
47. Тепловой КПД сушильной камеры как отношение q_1 (п 19) к теплоте израсходованного насыщенного пара (п 38) с его энтальпией при 0,3 МПа (3 бар) 2725 кДж/кг (651 ккал/кг) η_c	п 19/(651·п 38)	0,40
48. То же отношение к теплоте сгоревшего топлива с учетом КПД котла вместе с паропроводами (на небольших и средних предприятиях $\eta_k=0,6$), η	п 47· η_k	0,40·0,6=0,24

Расход топлива определяется на $Id\alpha$ -диаграмме по линиям $g = \text{const}$, а также по (83) и (87).

Газообмен в газовых сушильных установках в несколько раз больше, чем расчетный воздухообмен в паровых.

Особенности теплового расчета сушильных туннелей

При тепловом расчете сушильных туннелей разность температур на обоих его концах устанавливаются, исходя из намеченных параметров режима сушки. Для хвойных пиломатериалов толщиной 25 мм $t_1 - t_2$ принимают около 25° С; она увеличивается для более тонких материалов и уменьшается для более толстых или при низкотемпературном режиме сушки.

На Id -диаграмме строят треугольник сушки и по нему выявляют величину $d_2 - d_1$, предопределяющую потребное для испарения влаги количество L воздуха (283).

Затем выявляют величину теплопотерь: на 1 кг испаряемой влаги с нагретым высушенным материалом; на подогрев древесины со льдом и на плавление льда в случае отрицательных температур древесины (см. рис. 56); через ограждения туннеля. Количество дополнительного воздуха L_d кг/ч для компенсации суммы этих теплопотерь Σq определяют из теплового баланса:

$$L_d c_v (t_1 - t_2) = \Sigma q, \quad (301)$$

где L_d — масса сухой части добавляемого воздуха, кг/ч; c_v — теплоемкость воздуха, равная $1,0 + 0,00184 d$ кДж/кг ($0,24 + 0,00044 d$ ккал/кг); $t_1 - t_2$ — разность температур на обоих концах туннеля; Σq — сумма теплопотерь.

Отсюда $L_d = \Sigma q / [c_v (t_1 - t_2)]$ кг/ч.

Например, для туннеля с пятью штабелями пиломатериалов, характеризующегося суммой теплопотерь 209 000 кДж/ч (50 000 ккал/ч), когда $t_1 - t_2 = 90 - 65^\circ \text{C}$ и $d_1 = 415$ г/кг,

$$L_d = \frac{209\,000}{(1,0 + 0,00184 \cdot 415)(90 - 65)} = 4750 \text{ кг/ч или } 4750 \cdot 1,75 = 8300 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$\left[\frac{50\,000}{(0,24 + 0,00044 \cdot 415)(90 - 65)} = 4750 \text{ кг/ч} \right].$$

102. ТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Сушильные камеры

На рис. 154, а, б, в схематически показана одноштабельная сушильная камера ТВК с торцовым одиночным вентилятором и вынесенными наружу обоими концами его вала. Опорные подшипники монтируются на внешней части стены вентилятор-

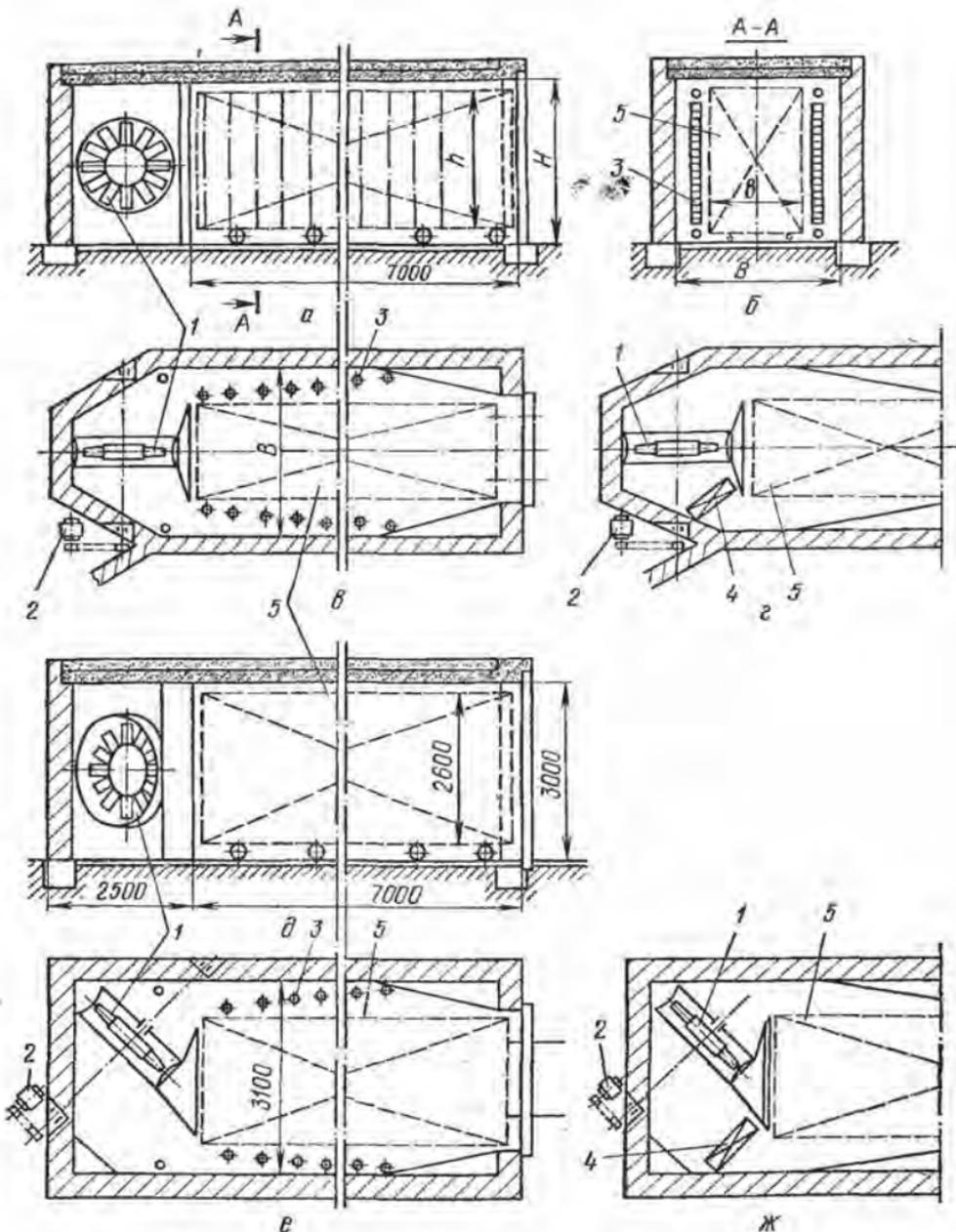


Рис. 154. Камеры с торцовыми вентиляторами:

1 — вентилятор; 2 — электродвигатель; 3 — калорифер из ребристых труб; 4 — калорифер пластинчатый; 5 — штабель пиломатериалов

ного отсека камеры. Калорифер применяют или из ребристых труб, размещенных вертикально с боков штабеля (рис. 154, б, в), или пластинчатый (рис. 154, г), устанавливаемый вблизи вентилятора. По этой схеме выполняют гамму типоразмеров сушильных камер (см. табл. 15) в зависимости от требуемой их мощности со штабелем, равным или меньше применяемого в существующих двухштабельных камерах или в туннелях.

На рис. 154, д, е, ж изображена схема аналогичной одноштабельной камеры, но с повернутой установкой вала и вентилятором крупных размеров (№ 20). В случае парного размещения камер — на внешней части их стен могут быть смонтированы оба подшипника удлиненного вала (рис. 154, е) — частота его вращения не высокая (500—600 об/мин).

На рис. 155 показаны сушильные камеры с верхними поперечными короткими валами, несущими по одному вентилятору на двух подшипниках. В камерах ВИАМ-40 (рис. 155, б) калориферы расположены в верхней части, а в камерах МТИ-1 (одноштабельной) или МТИ-2 (двухштабельной) — на продольных стенах (рис. 155, в). Вентиляторы применяют реверсивные № 12,5. Диаметр вала на средней трети его длины в камерах МТИ-3 и МТИ-4 (рис. 155, г) около 100 мм. Оба подшипника находятся вне камеры.

При настенном монтаже ребристых труб предусматривают экранизацию их прифланцевых участков со стороны материала для избежания перегрева кромок досок. Оребренная часть труб не нуждается в экранизации, так как выделяет лучеиспусканием очень мало тепла.

На рис. 156 представлены сушильные камеры с эжекционно-реверсивной циркуляцией воздуха, осуществляемой центробежными вентиляторами. В двухштабельных камерах применяют вентилятор Ц4-70 № 12 с частотой вращения около 850, а в одноштабельных — вентилятор Ц4-70 № 8 — 1250 оборотов в минуту.

На нагнетательном воздуховоде монтируют щелевидные сопла с выходным отверстием в среднем 55×300 мм (расширяются кверху до 70 и сужаются книзу до 40 мм) и шагом сопел 500 мм. Форма сопла клиновидная; ширина его увеличивается от выходного отверстия к нагнетательному каналу в 2 раза (от 55 до 110 мм). На каждой продольной стене установлено до 8—10 рядов ребристых труб.

Аналогичная камера, но снабженная двумя попеременно действующими осевыми вентиляторами с объемными кручеными лопатками (ВОК-1) показана на рис. 157, а, б. Оба подшипника вала находятся в коридоре управления. За вентилятором (по ходу воздуха) размещен неподвижный спрямляющий аппарат диаметром также 1000 мм с 11 некручеными листовыми, но криволинейными в сечении лопатками, установленными так,

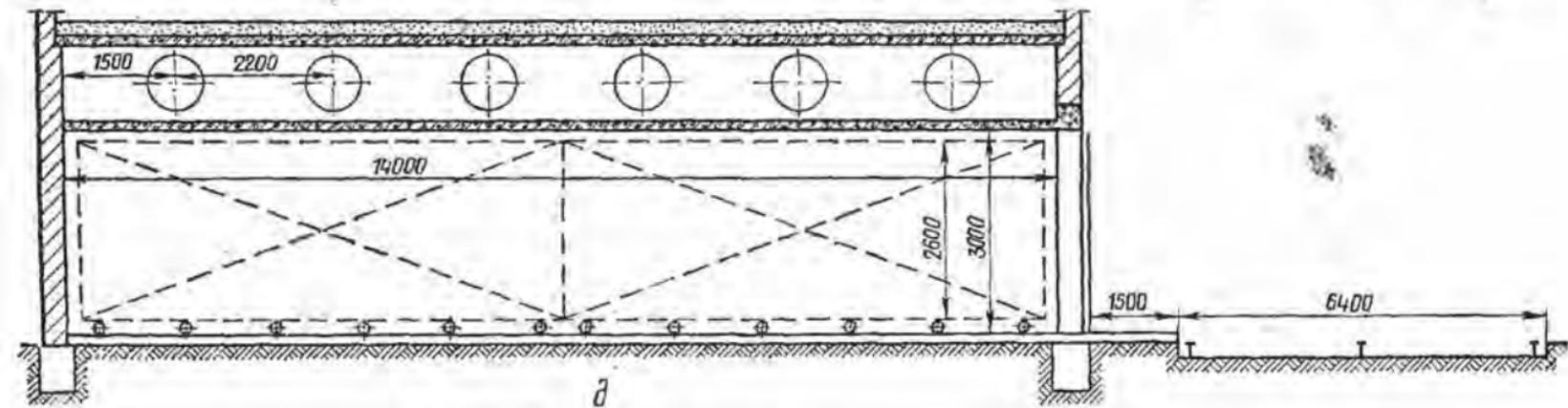
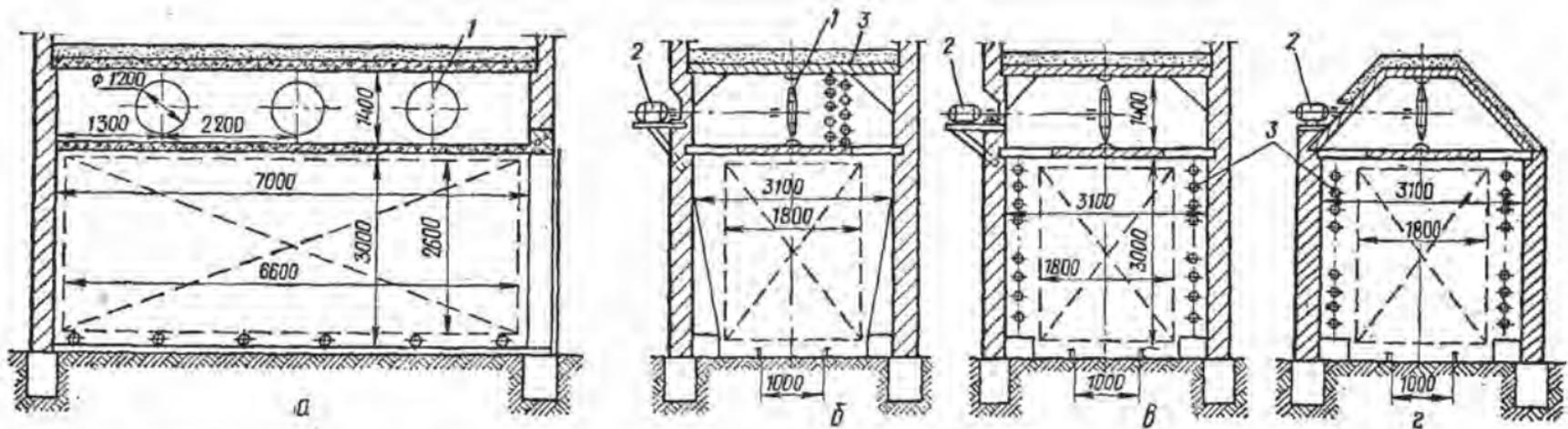
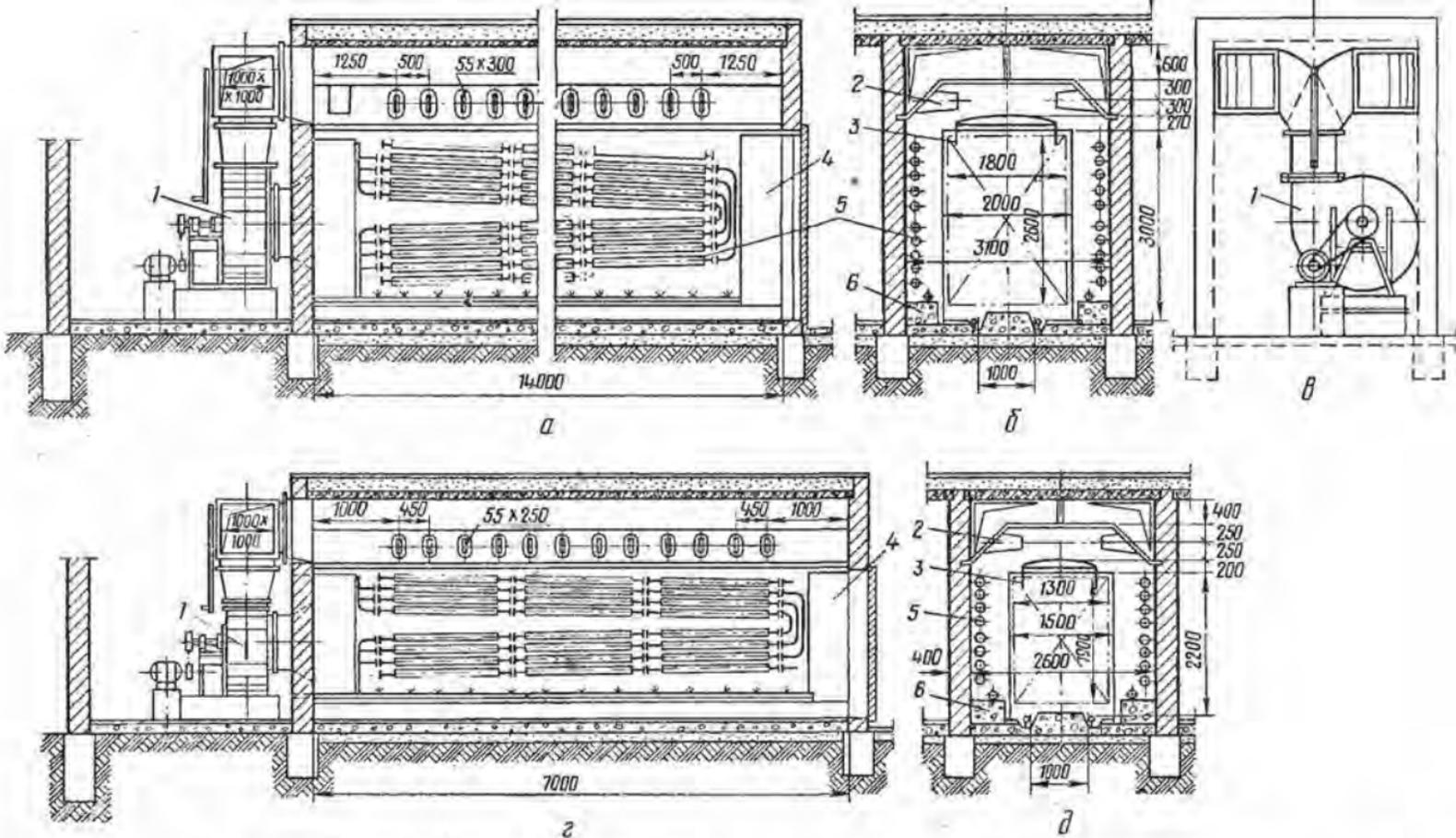


Рис. 155. Камеры с верхними поперечными валами вентиляторов:

а, в — МТИ-1; в, д — МТИ-2; а, г — МТИ-3; г, д — МТИ-4; б, д — ВИАМ 40; 1 — вентилятор; 2 — электродвигатель; 3 — калорифер



Фиг. 156. Паровые эжекционно-реверсивные камеры с центробежными вентиляторами:

а, б, в — двухштабельная камера; *г, д* — одноштабельная камера с уменьшенным штабелем; *1* — вентилятор; *2* — сопла; *3* — подвесные шторы по всей длине камеры; *4* — вертикальные приторцовые экраны; *5* — калорифер; *6* — строительные экраны выступы

чтобы поток воздуха спрямлялся и поступал в нагнетательный канал в осевом его направлении.

На рис. 157, *в* дан чертеж вентиляторного узла. Длина консоли вентилятора 800 мм, расстояние участка вала между подшипниками 1000 мм, диаметр вала на этом участке 99 мм. Оба подшипника снимаются в сторону электродвигателя. Масса вентилятора — до 35 кг. По этой схеме рекомендуется модернизировать существующие эжекционно-реверсивные камеры, эксплуатируемые в промышленности. Желательно осуществить централизованное изготовление вентиляторных узлов.

Камера характеризуется высокой технической и эксплуатационной эффективностью. В ней нет внешних воздухопроводов с неизбежными для них аэродинамическими сопротивлениями и тепловыми потерями. Создается также нормальная среда для обслуживающего персонала и оборудования в коридоре управления.

В целях снижения паразитного перетекания воздуха мимо материала во всех камерах с поперечной циркуляцией рекомендуется установить вертикальные экраны 1 сбоку торцов штабелей, а также устроить строительные выступы 2 внизу и подвесные шторы 3 сбоку штабелей, перекрывающих возможные пути для перетекания воздуха. Рекомендуется также применять переносные или сдвижные вертикальные экраны, устанавливаемые сбоку смежных торцов двух загруженных в камеру штабелей.

На рис. 158 приведен чертеж сушильной камеры, использующей в качестве источника тепла природный газ. Особенность оборудования такой камеры — более мощные осевые вентиляторы (ВОК-1,1 вместо В-9) и увеличенный размер эжектирующих конических сопел (диаметр выходного отверстия около 170 мм при шаге 700 мм). В этом случае к материалу подается около 80 м³/с, или 300 000 м³/ч, воздуха при производительности вентилятора около 60 000 м³/ч; возможна установка и центробежных вентиляторов (рис. 158, *д*).

На рис. 159 приведена схема транспортательной двухштабельной сушильной камеры СПВ-64 (УЛ-2), предназначенной для высококачественной сушки пиломатериалов ответственного назначения. Ее предыдущая модель показана на рис. 92, *е*. В новой модели (см. рис. 159) применены три вентилятора № 12,5 вместо 4 вентиляторов № 10, что позволило снизить частоту их вращения, а также потребляемую мощность при одновременном увеличении общей подачи воздуха.

Камера СПВ-64 изготавливается из четырех частей — двух нижних 1 и двух верхних 3 с вентиляторами и приводом. Ее основные показатели приведены в табл. 16. Камера может быть одноштабельной (СПВ-63). Ее поставляет Петрозаводское предприятие бумажного машиностроения.

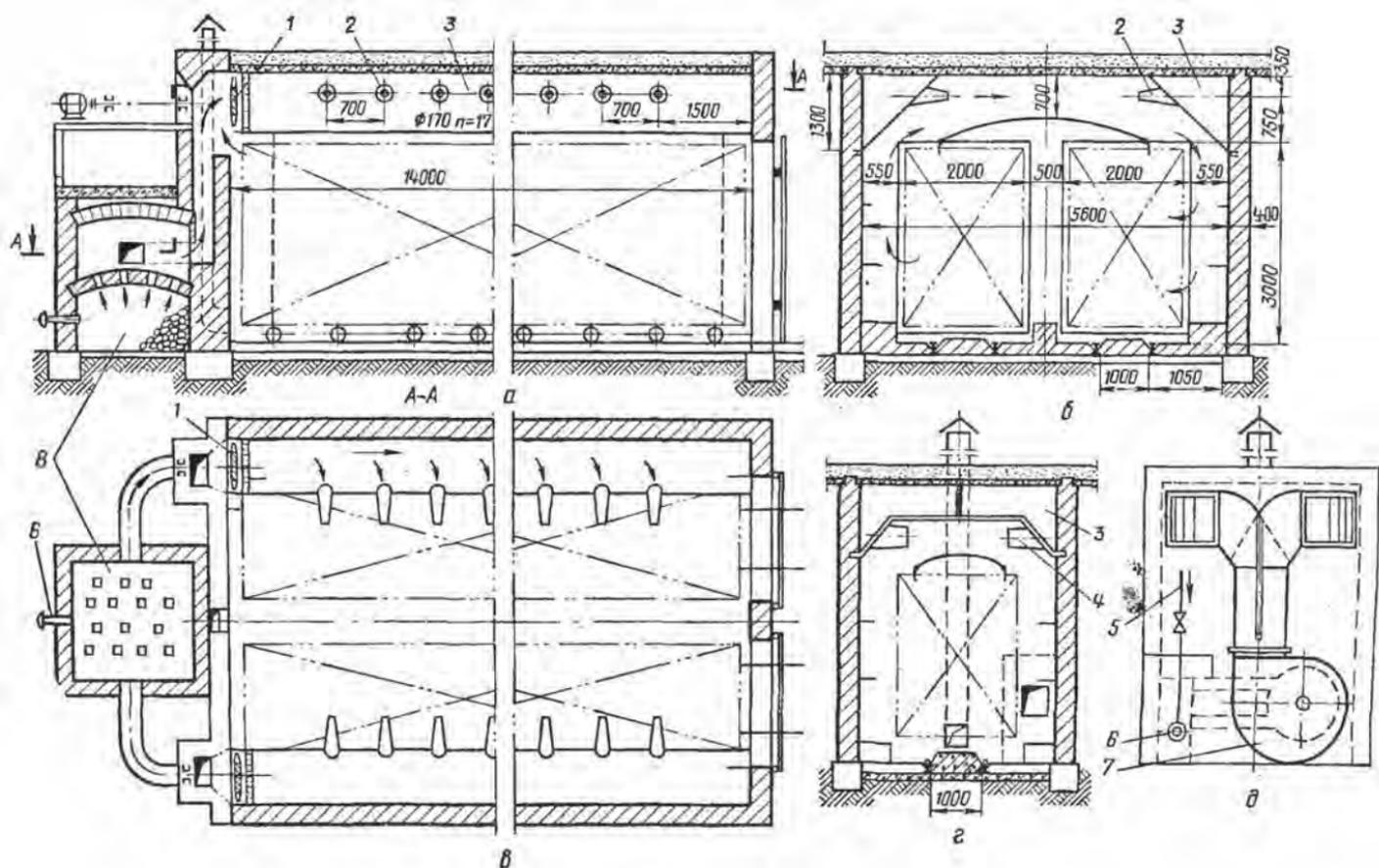


Рис. 158. Сушильные камеры, отапливаемые природным газом:

а, б, в — четырехэтабная камера; г, д — двухэтабная камера (поперечный разрез и вид на оборудование); 1 — осевой вентилятор ВОК-1,0; 2 — сопла конические; 3 — нагнетательный канал; 4 — сопла щелевые; 5 — газопровод; 6 — эжекционная горелка на $50 \text{ м}^3/\text{ч}$; 7 — центробежный вентилятор Ц4-70 № 12; 8 — подтонок

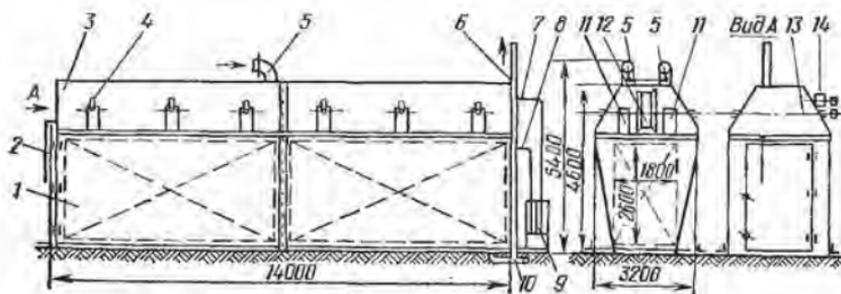


Рис. 159. Сушильная камера СПВ-64 (УЛ-2):

1 — нижняя часть камеры; 2 — дверь с прижимом; 3 — верхняя часть камеры; 4 — привод вентилятора; 5 — приточные трубы; 6 — вытяжная труба; 7 — паропровод к калориферам; 8 — паропровод влагообработки материала; 9 — система автоматизации; 10 — гидравлический затвор; 11 — калориферы; 12 — вентилятор; 13 — вал вентилятора; 14 — электродвигатель

Сушильные туннели

На рис. 160, а, б показан противоточный сушильный туннель типа ЦНИИМОД-26 для нетолстых заготовок с пластинчатыми калориферами, а на рис. 160, в, г, д — с ребристыми трубами. Устраиваются аналогичные по конструкции, но более короткие (10 м) туннели, предназначенные для сушки тонких, в том числе тарных, заготовок.

При высушивании древесины лиственных пород, выделяющих активные кислоты, разрушающие пластинчатые калориферы, рекомендуются туннели, оборудованные чугунными ребристыми трубами.

На рис. 161 показаны сечения паровых и газовых семиштабельных туннелей с зигзагообразной циркуляцией воздуха. Они не требуют загрузки пиломатериалов одномерной длины. Предусмотрен промежуточный отбор сушильного агента, регулирование его количества на загрузочном конце, предотвращение коробления пиломатериалов в верхних рядах штабеля и возможность перехода к проведению двухстадийного режима сушки. Эти туннели (рис. 161, ж) показали в эксплуатации хорошие результаты и рекомендуются к широкому применению вместо распространенных пятиштабельных паровых и газовых туннелей.

Их преимущества (для внутрисоюзного применения) по сравнению с туннелями СП-5КМ и СМ-4К, предназначенными для низкотемпературной сушки до транспортной влажности экспортных пиломатериалов следующие: установка электродвигателей за пределами газового потока с применением нормальных и даже форсированных, стерилизующих древесину режимов сушки, позволяющих получить желательную для производства пониженную конечную ее влажность; меньшая (примерно

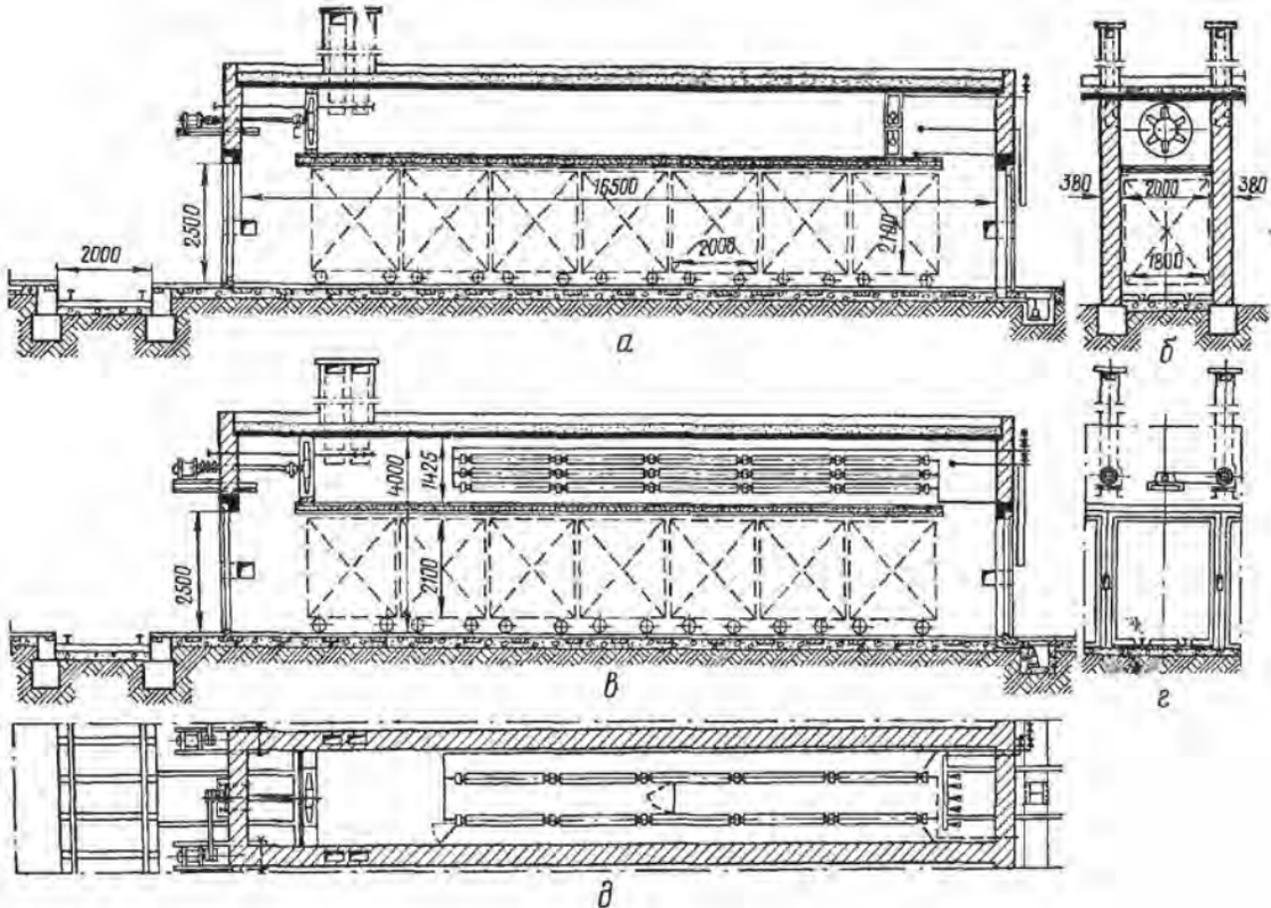


Рис. 160. Сушильные туннели для заготовок:

а, б — ЦНИИМОД-26 с пластинчатыми калориферами; в, г, д — ЦНИИМОД-27 с ребристыми трубами

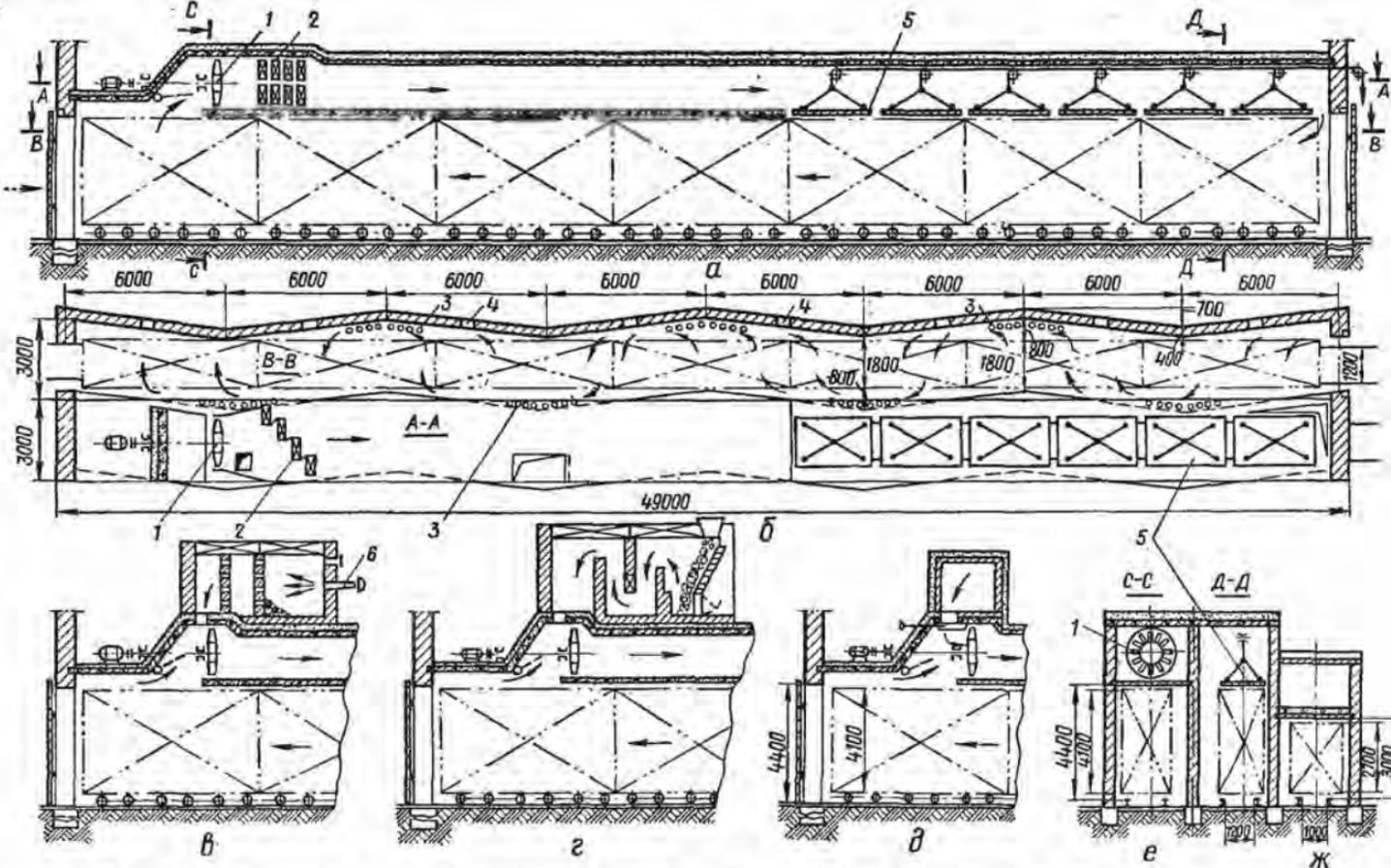


Рис. 161. Семистабельные сушильные туннели с зигзагообразной циркуляцией сушильного агента:

а — продольный разрез; *б* — план; *в* — узел компоновки отопления природным газом или мазутом; *г* — то же отопления твердым топливом; *д* — то же при блочной вынесенной топке; *е* — поперечные разрезы по высокому туннелю; *ж* — то же по туннелю обычной высоты; *1* — вентилятор; *2* — пластинчатый калорифер; *3* — дополнительные калориферы из ребристых труб; *4* — переходные по туннелям калитки; *5* — прижимные плиты; *6* — газовая горелка

в 2 раза) продолжительность процесса; возможность высушивания укороченных (продольно перемещаемых) штабелей пило-материалов при значительной их высоте (до 5,2 м) и нормальной ширине (1,8 м) без устройства специальных подштабельных тележек и ограждающих зданий с пролетом 36 м (для туннелей СМ-4К); взаимозаменяемость отопления (см. рис. 61); короткие концентрированные фронты погрузочных и разгрузочных работ при обычной ширине дверей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. В. Тепломассообмен (справочник). М., 1972. 560 с.
2. Лыков А. В. Теория сушки. М., 1968. 472 с.
3. Пятакин В. И. Проблема повышения плавучести круглых лесоматериалов. М., 1976. 264 с.
4. Михайлов Ю. М. Сушка перегретым паром. М., 1967. 198 с.
5. Ривкин С. А., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М., 1975. 79 с.
6. Техническая термодинамика/В. А. Кириллин и др. М., 1974. 447 с.
7. Кришер О. Научные основы техники сушки. М., 1961. 540 с.
8. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М., 1973. 528 с.
9. Гирш М. Техника сушки. Пер. с нем. М., 1937. 628 с.
10. Кречетов И. В. Сушка древесины топочными газами. М., 1961. 270 с.
11. Кречетов И. В. Сушка древесины. М., 1972. 440 с.
12. Кречетов И. В. Сушка древесины. М.-Л., 1949. 528 с.
13. Кречетов И. В. Пуск и эксплуатация газовой сушильной установки непрерывного действия системы Кречетова. ЦНИИТЭИлеспром. М., 1965. 24 с.
14. Ребиндер П. А. О формах связи влаги с материалом в процессе сушки. Всесоюзное научно-техническое совещание по сушке. Пленарное заседание. М., 1958, с. 20—33.
15. Weichert L. Sorptionsverhalten von Fichte und Presswollholz. Holz als Roh und Werkstoff, 21, 8, 1963.
16. Ржаницин А. Р. Определение напряжений в тонком слое при сушке с учетом изменений характеристик ползучести материала.— В кн.: Труды Всесоюзного совещания по сушке. Секция строительства, М., 1958, с. 228—234.
17. Бывших М. Д. Влияние температуры и влажности древесины на ее упруго-пластические свойства.— Деревообрабатывающая промышленность, 1959, № 2, с. 13—15.
18. Уголев Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М., 1975. 383 с.
19. Иванов Ю. М. О первых работах по определению величины коробления.— Труды ИЛ АН СССР, т. 51, 1962, с. 120—123.
20. Кречетов И. В. Пути интенсификации сушки древесины.— Труды всесоюзного совещания по сушке. Лесотехническая секция, М., 1958, с. 6—44.
21. Кречетов И. В. Влажностные деформации древесины.— Деревообрабатывающая промышленность, 1958, № 4, с. 10—14.
22. Куликов И. В. Технология изготовления и ремонта мебели по заказам населения. М., 1974. 424 с.
23. Kollmann F. Principles of Wood Science and Technology, Berlin — New York, Springer — Verlag, 1968, 592 p.

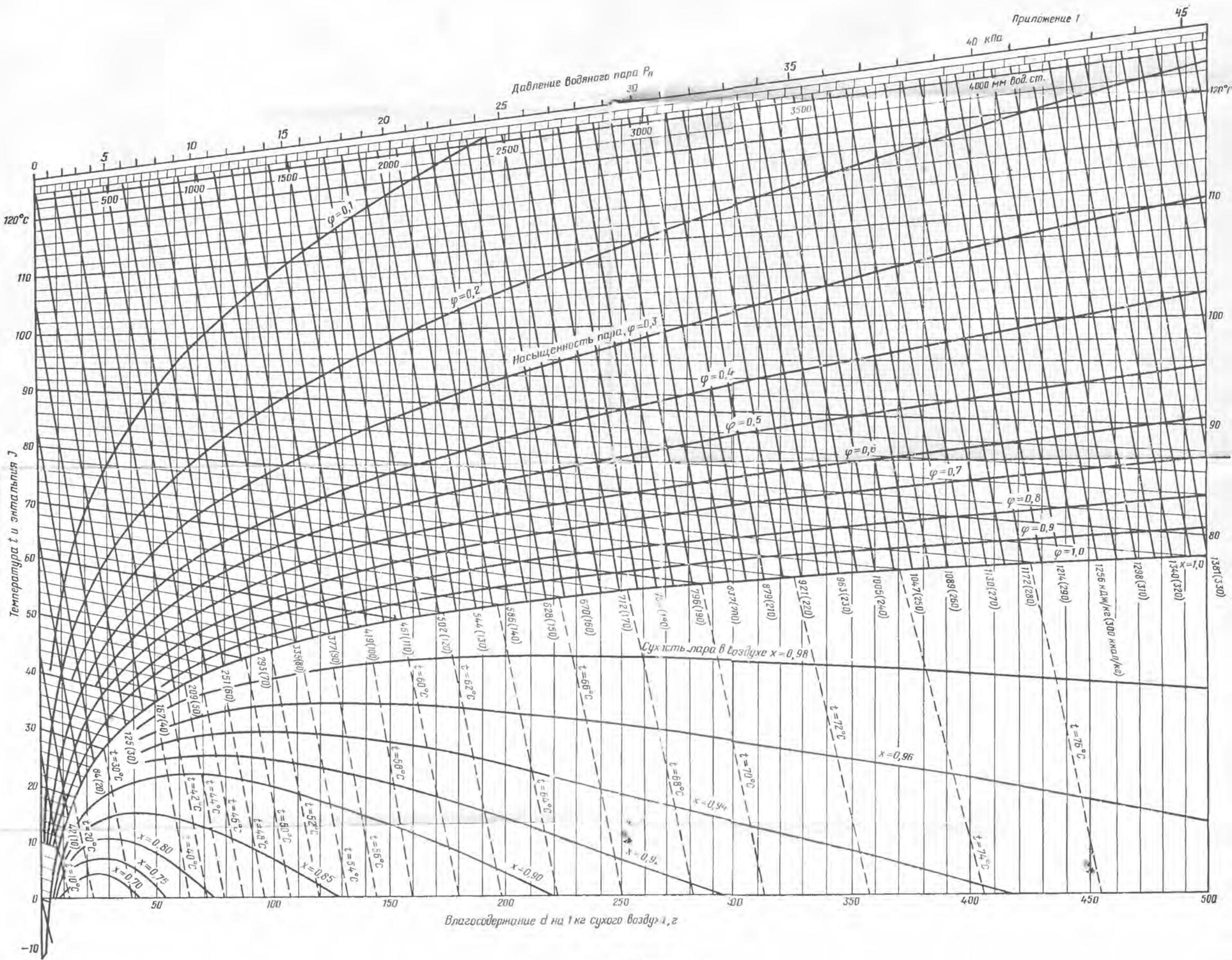
24. Чудинов Б. С. Теория тепловой обработки древесины. М., 1968. 255 с.
25. Серговский П. С. Режимы и проведение камерной сушки пиломатериалов. М., 1976. 135 с.
26. Перельгин Л. М. Древесиноведение. М., 1969. 318 с.
27. Серговский П. С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М., 1975. 402 с.
28. Гухман А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена. М., 1967. 303 с.
29. Лебедев П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М.-Л., 1963. 320 с.
30. Таблицы физических величин. Справочник. М., 1970. 1006 с.
31. Janik W. Handbuch der Holz Trocknung, Leipzig, Veb. Fachbuchverlag, 1965, S. 221.
32. Widlak H. Анализ режима конвективной сушки пиломатериалов. Варшава, Przemysl drzewny, 1975, № 3, с. 21—24.
33. Микит Э. А. Метод определения продолжительности конвективной сушки пиломатериалов.—Деревообрабатывающая промышленность, 1966, № 1, с. 14—16.
34. Кречетов И. В. Пути и методы совершенствования лесосушильной техники.—Труды Всесоюзного совещания. Архангельск, 1975, с. 6—10.
35. Коваль В. С. Влагодпроводность древесины сосны, бука и дуба вдоль волокон.—Лесной журнал, 1971, № 6, с. 152—155.
36. Schneider A.—„Holz als Roh und Werkstoff“, 1972, — 10, s. 382—393.
37. Rusche H.—„Holz als Roh und Werkstoff“, 1973, № 7, 273—281, 1973, № 8, s. 307—312.
38. Петровский А. М. Дискретная циркуляция агента сушки.—Рсф, информ. Механическая обработка древесины, 1970, № 9, с. 8—9.
39. Мингазов М. Г., Качалин Н. В. Осциллирующие режимы сушки пиломатериалов. М., 1976. 49 с.
40. Харитонов Г. Н., Мачулис С. П., Козлов В. А. Лесосушильная камера СПЛК-2.—Деревообрабатывающая промышленность, 1976, № 8, с. 4 и 5.
41. Пыльников Н. А. Сушка древесины. Киев, 1968. 120 с.
42. Пейч Н. Н., Царев Б. С. Сушка древесины. М., 1975. 224 с.
43. Политехнический словарь. М., 1977. 608 с.
44. Вентиляторы.—В кн.: Промышленная аэродинамика. М., 1966 (САГП), вып. 28, с. 182—205.
45. Соколов П. В., Харитонов Г. Н. 2-е изд. Лесосушильные камеры. М., 1980. 184 с.
46. Агапов В. П., Богданов Е. С. Система автоматического регулирования режима сушки древесины.—Деревообрабатывающая промышленность, 1977, № 5, 22, 23.
47. Музалевский В. И. Измерение влажности древесины. М., 1976. 120 с.
48. Гашкова А. К. Влияние влажности на качество столярно-строительных изделий. М., 1974. 80 с.
49. Руководящие материалы по камерной сушке пиломатериалов. Архангельск, 1977. 152 с.
50. Глухих В. Н. Предотвращение коробления пиломатериалов при камерной сушке. М., 1975. 35 с.
51. Харитонов Г. Н. Механизация работ в лесосушильных цехах. М., 1974. 70 с.
52. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим. М., 1954. 408 с.
53. Нормативы по камерной сушке пиломатериалов. М.-Л., 1957. 39 с.
54. Горшин С. Н. Атмосферная сушка пиломатериалов. М., 1971. 295 с.
55. Технология пиломатериалов/П. П. Аксенов и др. М., 1976. 479 с.
56. Вакин А. Т. Хранение круглого леса. М., 1964. 428 с.

57. Песоцкий А. Н., Ясинский В. С. Проектирование лесопильно-деревообрабатывающих производств. М., 1976. 375 с.
58. Игумнов А. Я. Интенсификация атмосферной сушки пиломатериалов.— В кн.: Сушка древесины (Труды Всесоюзной конференции), Архангельск, 1968, с. 272—279.
59. Стерлин Д. М. Сушка в производстве фанеры и древесностружечных плит. М., 1977. 382 с.
60. Соколов П. В. Проектирование сушильных и нагревательных установок для древесины. М., 1965. 331 с.
61. Бирюков В. А. Камерная сушка древесины в электрическом поле высокой частоты. М.-Л., 1950. 102 с.
62. Виноградский В. Ф. Скоростная вакуумная сушка древесины в поле ТВЧ.— Деревообрабатывающая промышленность, 1960, № 7, с. 7 и 8.
63. Горяев А. А. Вакуумно-диэлектрическая сушка древесины ели.— Труды ЦНИИМОД, вып. 32, Архангельск, 1974, с. 98—105.
64. Акишенков С. И. Защита пиломатериалов от растрескивания при сушке. М., 1978. 33 с.
65. Теплотехнический справочник. Т. 2, М., 1976. 896 с.
66. Красников В. В. Коиндуктивная сушка. М., 1973. 288 с.
67. Берлинер М. А. Измерение влажности. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1973. 400 с.
68. Петровский А. М. Исследование оптимальной плотности укладки брусковых пиломатериалов в штабель.— Механическая обработка древесины, 1972, № 11, с. 9.

40 кПа

4000 мм вод. ст.

Давление водяного пара P_n



t*i*-Диаграмма

