

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 трещины и раковины	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 просушивания 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

1. 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. Относительные 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

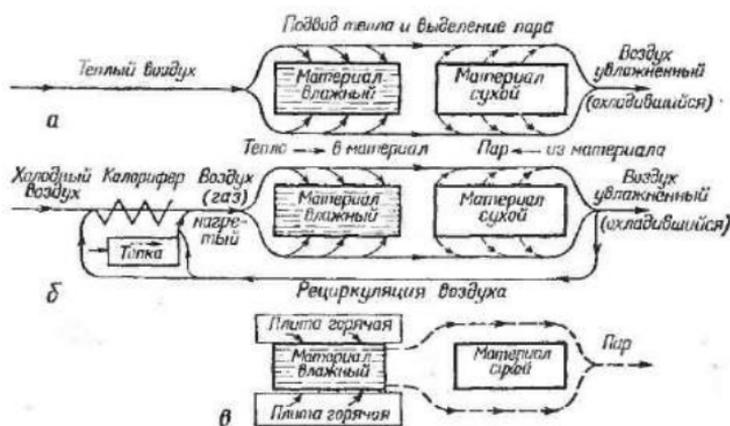


Рис. 1. Принципиальная схема подвода тепла к высушиваемому материалу: а — конвективно — с теплым воздухом (при атмосферной сушке); б — конвективно — с нагретым воздухом или продуктами сгорания (в сушильных установках); в — кондуктивно — горячими плитами, с выпариванием влаги (штриховкой показана влага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

продуктами сгорания) и уноса испарившейся влаги этим же, но частично увлажнившимся и охлажденным 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

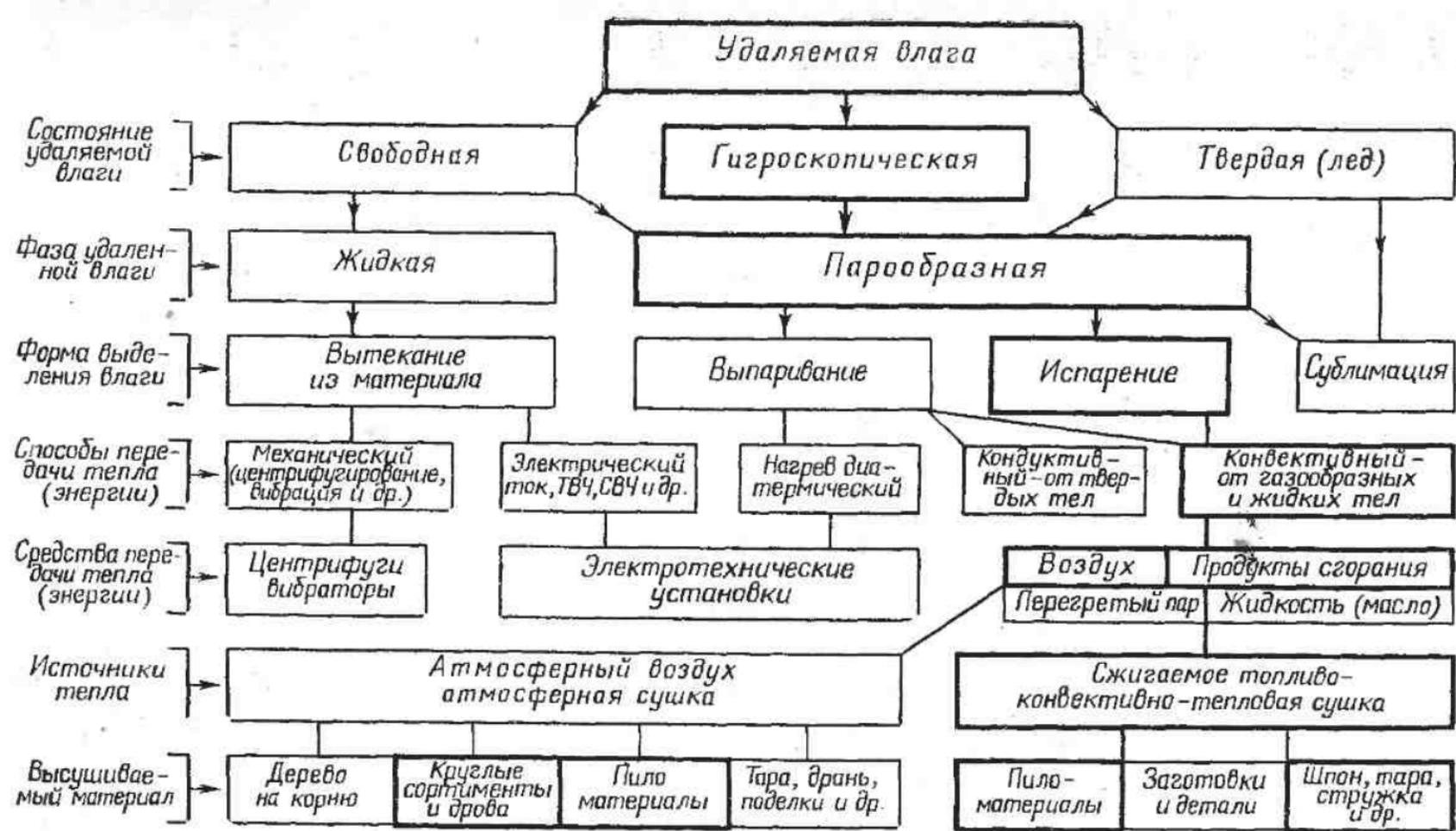


Рис. 2. Структурная схема различных методов и процессов обезвоживания древесины

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. Непросушенную 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. Неудовлетворительная 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 неответственного 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 сечений 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 calorиферах — 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*)

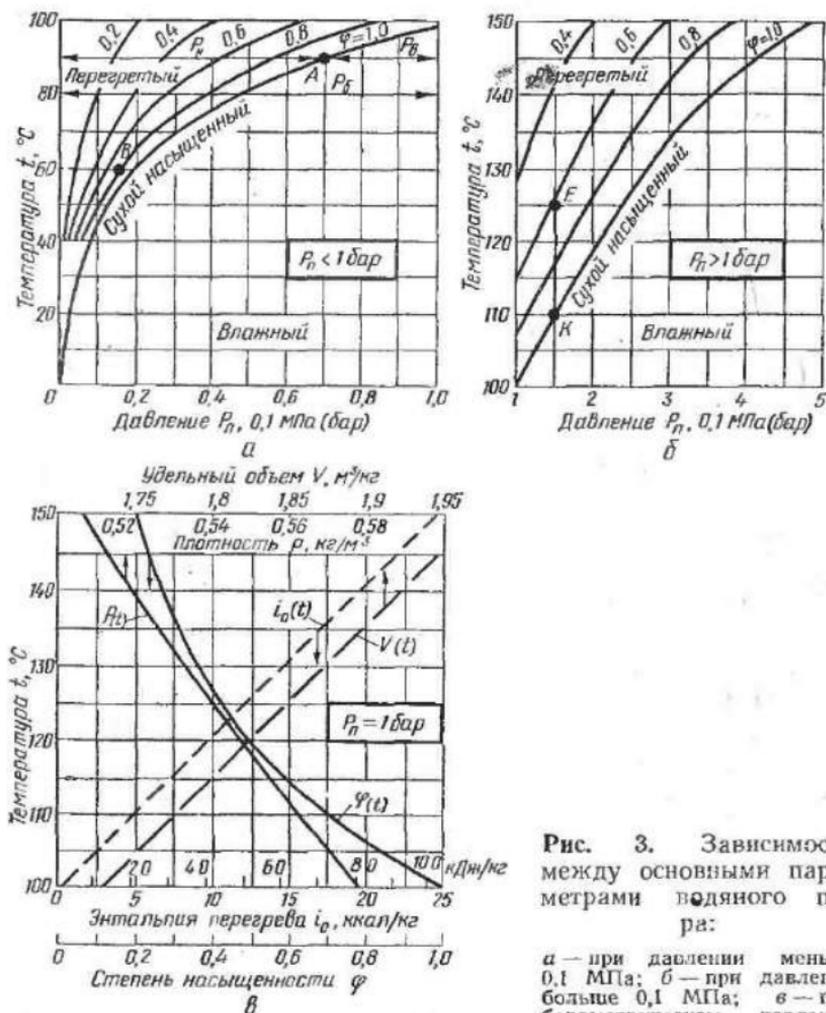


Рис. 3. Зависимость между основными параметрами водяного пара:

a — 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

дений 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_v , 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_v 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. (приблизленно 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

1. 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

$$p_n = \rho_n R_n T = \rho_n [R_n (273,15 + t)], \quad (2)$$

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, желательно 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: $\varphi = 1/p_n$ (здесь p_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 $p_n=0,1$ МПа (1,02 кгс/см²)

Температура пара t , °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·°С)].

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°С плотность абс. сух. воздуха $\rho_v = 100000 / (287 \cdot 293) = 1,19$ кг/м³.

Закон Дальтона устанавливает, что барометрическое давление воздуха складывается из парциальных (pars — 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* ($1000 \rho_{\text{п}}$), выраженной в граммах на 1 м^3 . Таким образом, абсолютная влажность определяется параметрами t , ϕ и не зависит от давления абс. сух. 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 $1000 \rho_{\text{п}}$. 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 $1000 \rho_{\text{п}}$ (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
$1000 \rho_{\text{п}}$	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

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

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 $\rho_n = \varphi \rho_n$. Иногда насыщенность пара в воздухе выражают в процентах:

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

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 ρ_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:

$$d = 1000 G_n / G_b = 1000 \rho_n / \rho_b, \quad (15)$$

где ρ_n — плотность пара, кг/м^3 ; ρ_b — плотность абс. сухого воздуха, кг/м^3 .

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

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

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·°C)]. Его энтальпия будет

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

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·°C)] [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. Влажесодержание 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_H , 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 1 м^3 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)

$$\rho = \frac{0,00349p - 0,001327p_n}{273 + t} = 0,001 \frac{3,49p - 1,32p_n}{273 + t}. \quad (25)$$

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 $p = 0,1 \text{ МПа}$ (бар) получим

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

Здесь плотность атмосферного воздуха (кг/м^3) 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, напишем

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

Подставив p_n из (18), получим для постоянного барометрического давления $0,1 \text{ МПа}$ (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-

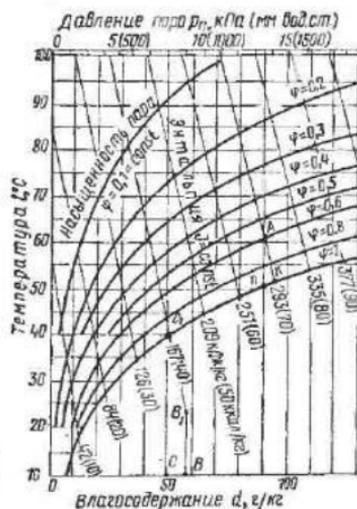


Рис. 4. td -Диаграмма воздуха с линиями: температур $t = \text{const}$ (горизонтали), влагосодержаний воздуха $d = \text{const}$ (вертикали), давлений пара $p = \text{const}$ (вертикали), энтальпий $I = \text{const}$ (наклонные) и степени насыщенности пара $\varphi = \text{const}$ (кривые)

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 вверху 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 $p_n=12600$ 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 $CO=50$ г/кг — количество пара. Общее влагосодержание покажет отрезок $BO=50+7$ 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 ось 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 $t=\text{const}$ и $I=\text{const}$ на I - d -диаграмме

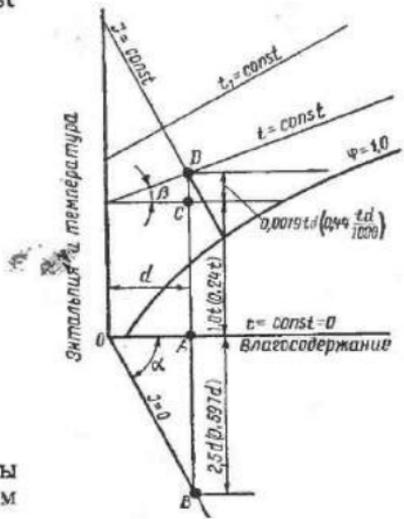
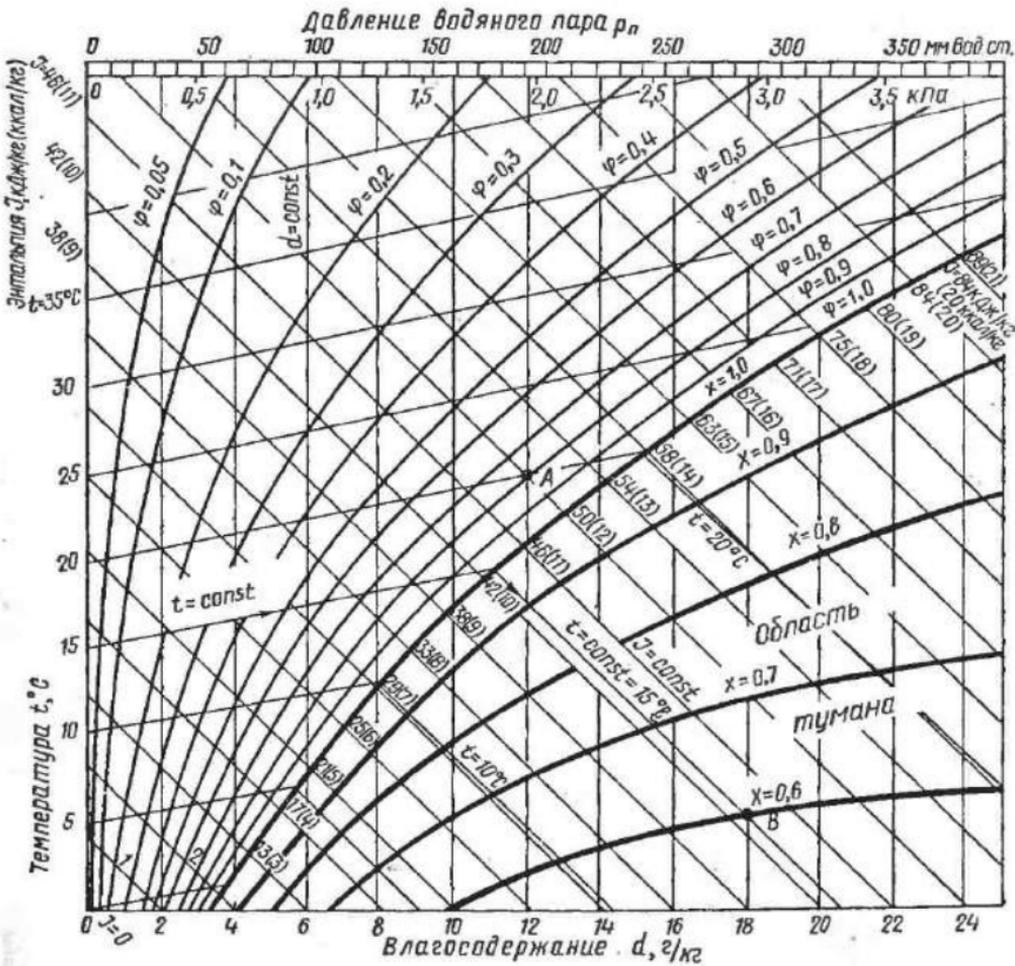


Рис. 6. Начальный участок I - d -диаграммы с линиями $I=\text{const}$, нанесенными под углом 45° к горизонтالي



с осью абсцисс. Так как отрезок CD , представляющий графическую теплоту пара $0,0019 td$ 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_t 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 вверх, 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_p и из (18), показывающего, что при $d = \text{const}$ величина p_p 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 $p_p = 0,1 \text{ МПа}$ (1 бар) и $t = 99,6^\circ \text{С}$. Они не имеют излома на изотерме $99,6^\circ \text{С}$ — зависимость $p_p(t)$ монотонная.

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 сверху 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 ($p_b < 5\,000$ Па).

Влажность воздуха d , г/кг

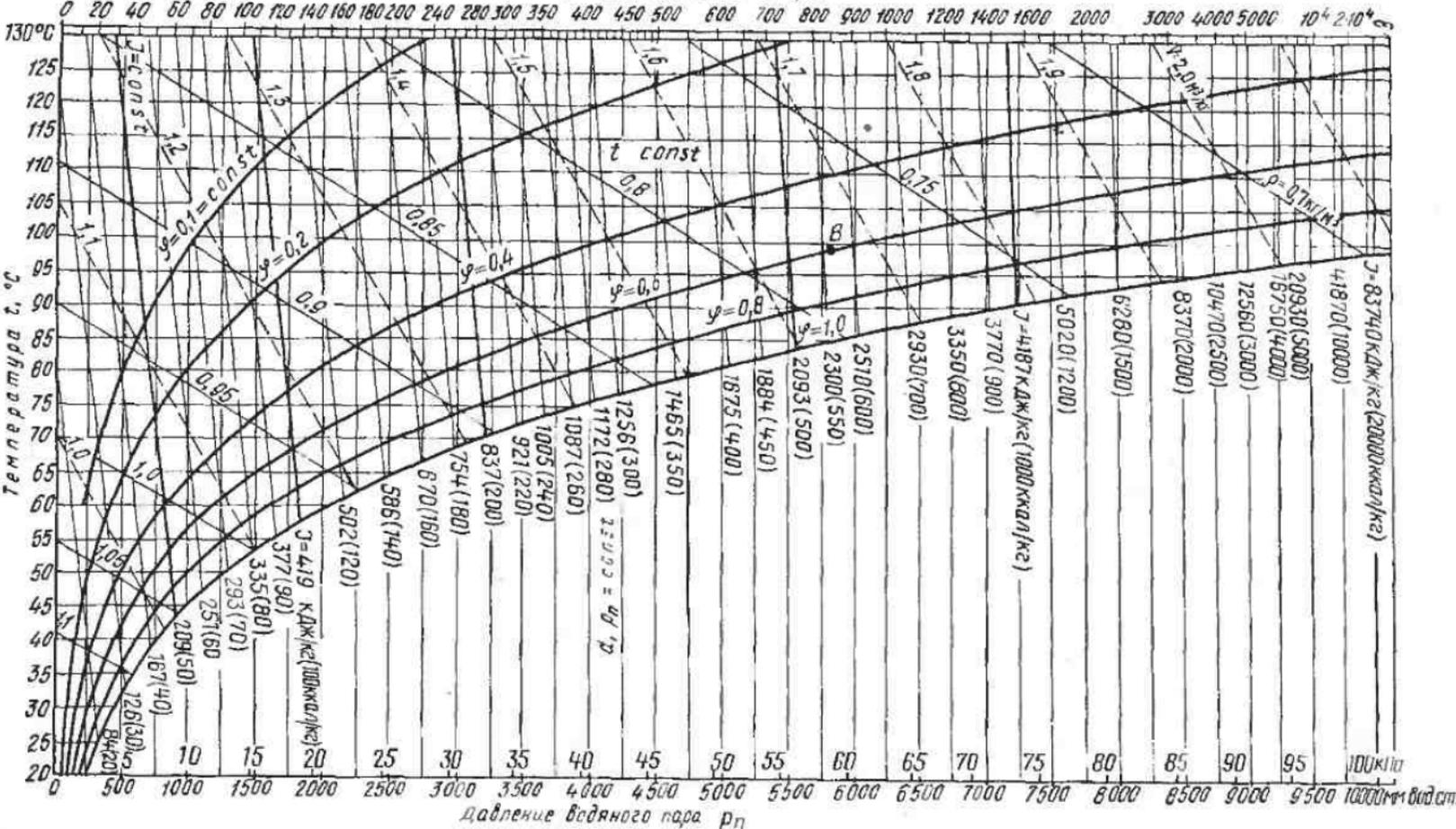


Рис. 8. t - p -Диаграмма паровоздушной смеси

11. 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 влажностного обмена нет, влагосодержание воздуха при теплообмене *остается неизменным* ($d = \text{const}$). Следовательно, процесс нагревания (например,

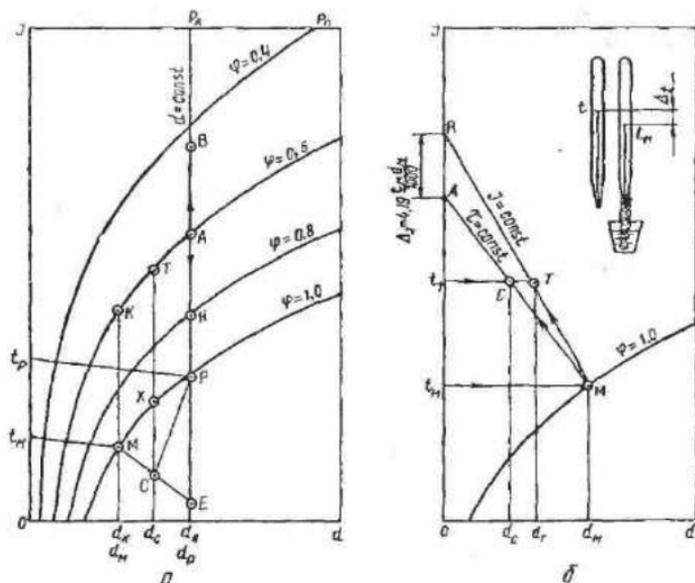


Рис. 9. Изображение на Id -диаграмме процессов:

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, вверху).

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 , p_p , 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 $\varphi = 1,0$ 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 $\varphi = 1,0$ — 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 $p_b = p - p_n$) и температурой по мокрому термометру психрометра в указанном диапазоне с достаточной для технических расчетов точностью выражается уравнением

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

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

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 :

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

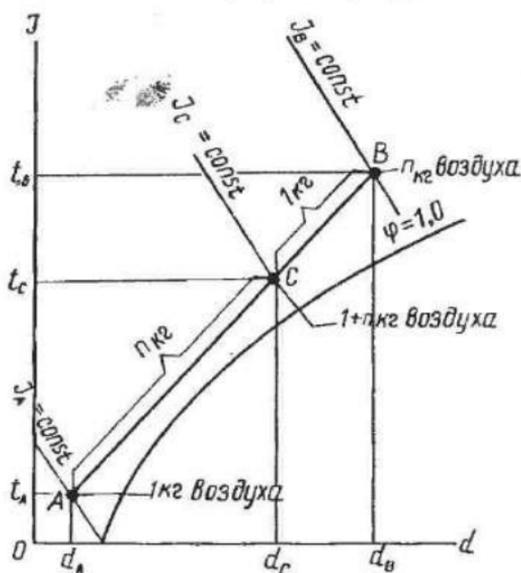
Количество воздуха B , определяемое величиной отрезка AC , принимаем равным n кг, а количество воздуха A , устанавливаемое величиной отрезка CB , — 1 кг.

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 θ , 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 обработанном 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.

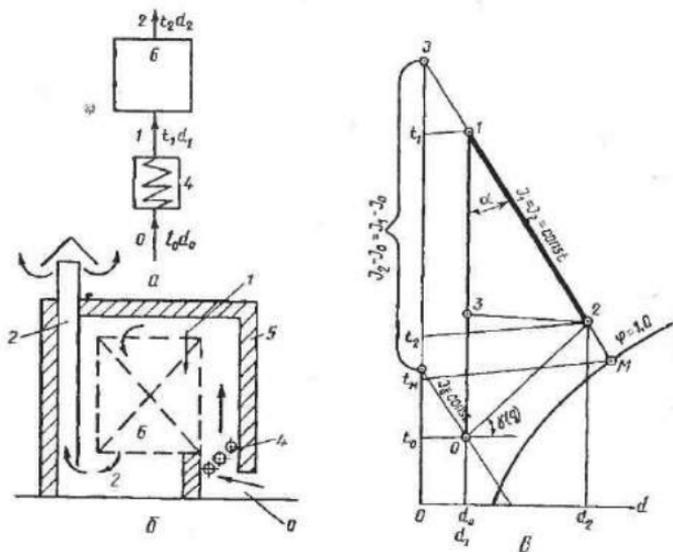


Рис. 11. Процесс сушки с однократной циркуляцией воздуха по материалу: 1 — нагретый воздух; 2 — обработанный воздух; 3 — полунатгретый воздух; 4 — калорифер; 5 — ограждение камеры; 6 — высушиваемый материал

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 .

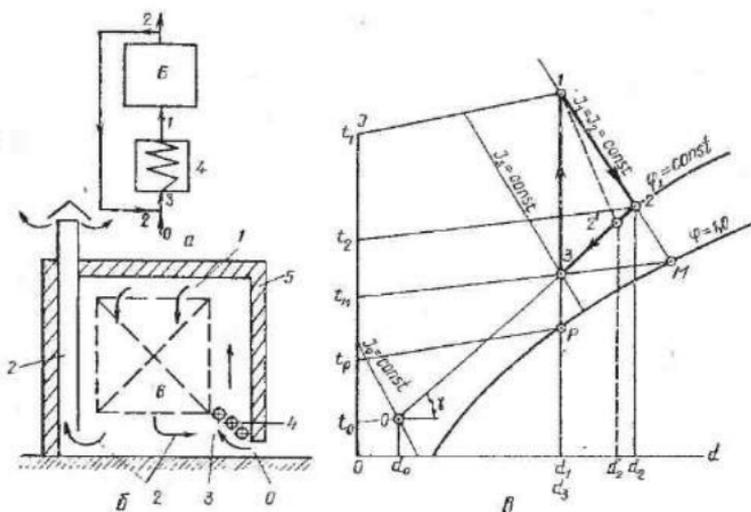


Рис. 12. Процесс сушки с многократной циркуляцией воздуха по материалу:

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 теплотери, относится и к однократной циркуляции воздуха [см. (40)].

Смещение пара с воздухом

При сушке пиломатериалов твердых пород или толстых сортов 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 $t_{см}$ определяют по правилу смешения:

$$t_{см} = \frac{c_{пt_{пn}} + c_{вт_{в}}}{c_{пn} + c_{в}}, \quad (46)$$

где $c_{п}$ и $c_{в}$ — соответственно массовая теплоемкость пара и воздуха; n — количество пара на 1 кг воздуха (обычно $n < 1$), кг; $t_{п}$ и $t_{в}$ — 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 $1000n$ (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_p больше температуры сушильного агента t_A , при этом $t_B > t_A$ и одновремен-

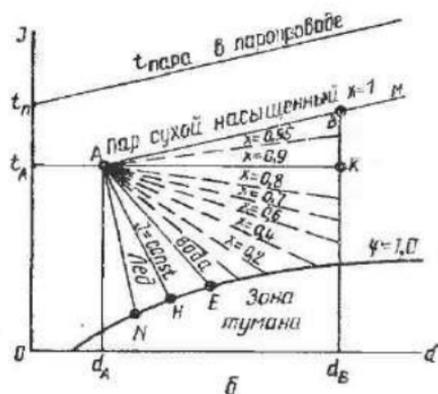
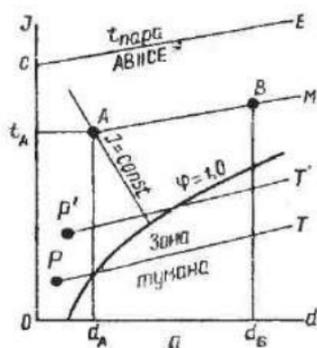


Рис. 13. Изображение на Id -диаграмме процессов смешения воздуха: a — с сухим насыщенным или перегретым паром; b — с влажным паром

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 $t_p = 100^\circ \text{C}$ 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 $t_p > t_A$. Предпочтительным для увлажнения воздуха в сушильных камерах будет сухой насыщенный пар низкого давления.

Процесс добавки к воздуху A пара влажного с температурой t_p 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 $АН$, соответствующий нулевой температуре воды, испаряемой воздухом A (например, распыляемой в него), направлен по линии $I = \text{const}$. Луч $АЕ$ соответствует температуре испаряемой воды $\approx 100^\circ\text{C}$ с энтальпией 419 кДж/кг (100 ккал/кг). Остальные лучи находятся внутри угла $ЕАМ$, 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 $АЕ$, по линии предела охлаждения, т. е. линии мокрого термометра (линия $СМ$ 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 $АН$ на рис. 13, б показывает испарение воды с температурой равной нулю, а отрезок $АН$ 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.

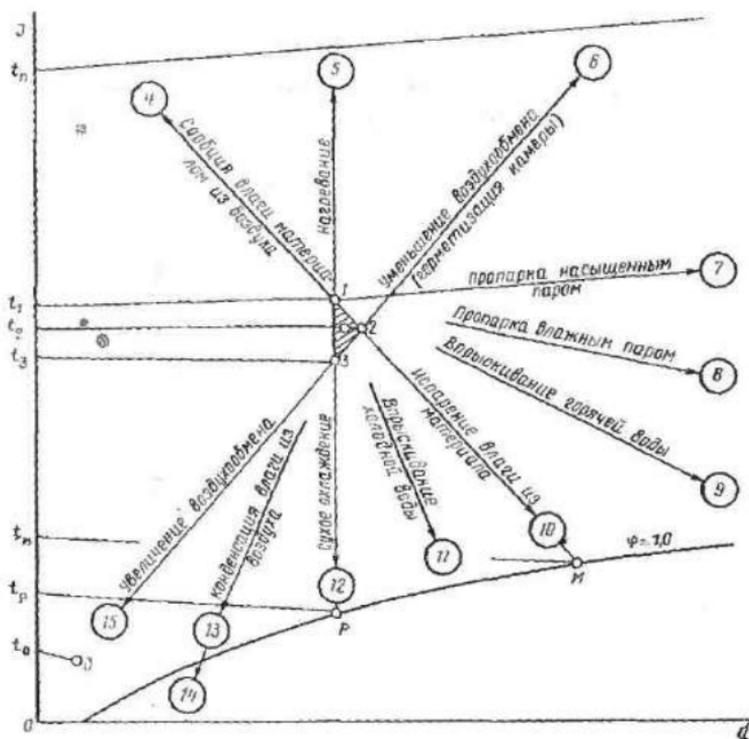


Рис. 14. Смещение на *Id*-диаграмме «треугольника сушки» при различных тепловлажностных воздействиях

При увеличении нагрева воздуха в калорифере треугольник сушки поднимется вверх по линии $d = const$ (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 *l₀* (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 теплотеперь 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 знтальпии. 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 пиломатериалов, 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 точки с топливоподачей примерно равно стоимости калориферного оборудования с паропроводной 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 незначительны и преодолимы. 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,

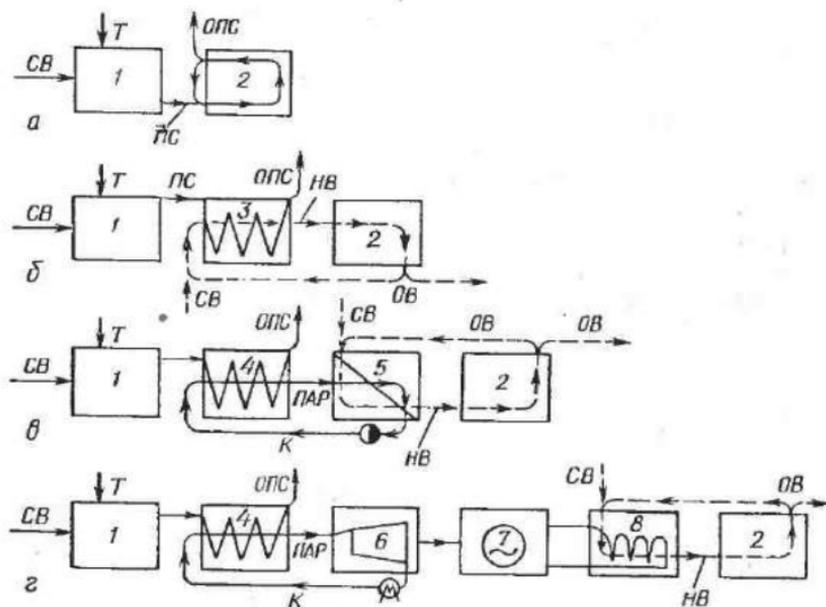


Рис. 15. Структурные схемы различных преобразований тепла в сушильных установках:

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 толпу, 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 , Δt).

Определяющий параметр продуктов сгорания как сушильного агента — зитальгия. 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; неспекаемая в шлак зола (не считая сильно загрязненной, сплавной древесины).

Элементарный химический состав древесины (с зольностью $A=2\%$) в абсолютно 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 абсолютно 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_B^p , определяемая в лабораториях калориметрическим методом или вычисляемая по формуле Д. И. Менделеева:

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

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

Низшую удельную теплоту сгорания Q_H^p кДж/кг или ккал/кг вычисляют по формуле

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

По этой формуле учитывают теплоту сгорания топлива в топках котельных 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):

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

[или $Q_B^P = 47,2(100 - W) = \frac{472\,000}{100 + w} \text{ (ккал/кг)}$]. (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 : $\alpha = V/V_T$, (54). В нормально действующих топках всегда $\alpha > 1$.

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

$$\alpha = 20,2/CO_2 \text{ или } CO_2 = 20,2/\alpha. \quad (55)$$

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 : C^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

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

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 $O^P = 49,2(100 - W)/100$, $H^P = 6,1(100 - W)/100$ 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' (m^3/kg) в расчетах топочных процессов приводят к нормальным условиям [при его давлении 101 300 Па (760 мм рт. ст.) и $0^\circ C$]. 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 влажосодержание 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 функций α и w :

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

Влажосодержание 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

$$I = (Q_B^p + \alpha G_0 I_0) / G_{с.г.} \quad (68)$$

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_B^p (53), G_0 (57) и $G_{с.г.}$ (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_B^p , т. е. теплота пара включается в энтальпию продуктов сгорания, а их количество $G_{с.г.}$ 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

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

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 :

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

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

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

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

$$t = (Q_H^p + \alpha G_0 J_0) / (G_{c,r} c_{c,r} + G_{II} c_{II}), \quad (74)$$

где $c_{c,r}$ — средняя массовая теплоемкость сухого газа; c_{II} — 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 $t(w)$

$$t = \frac{737 - w + \alpha J_0}{(0,072 + \alpha) c_{c,r} + (0,0922 + 0,0168w + 0,001\alpha d_0) c_{II}}. \quad (75)$$

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 $t_r=0^\circ C$.

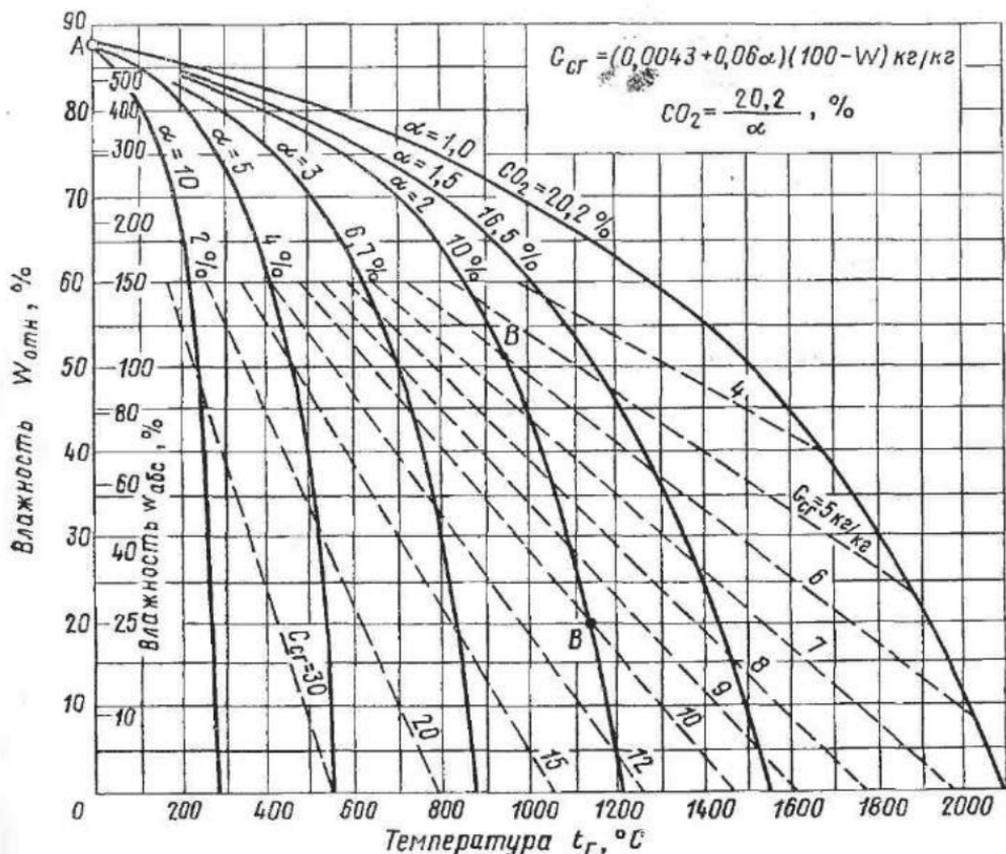


Рис. 16. Параметры продуктов сгорания при теоретическом горении древесины:

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):

$$G_{п} = 0,549 + 0,00451W + 0,00006cd_0(100 - W) = 0,549 + 0,225 + 0,054 = 0,828 \text{ кг/кг}.$$

Количество сухих продуктов сгорания по (64):

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

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 $Id\alpha$ -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:

$$I = \frac{d}{0,0276 + 0,000305w} \text{ кДж/кг} \left(\frac{d}{0,116 + 0,00212w} \text{ ккал/кг} \right). \quad (77)$$

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 $\alpha = 1$.

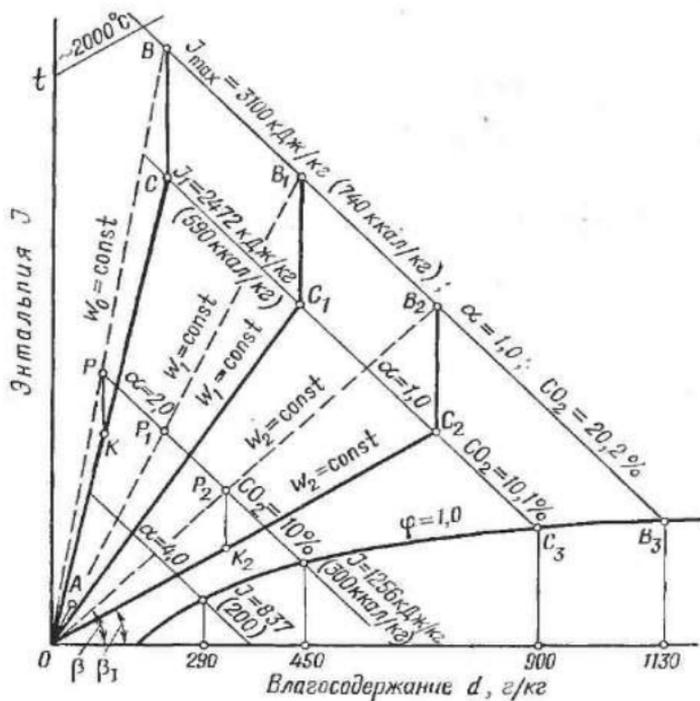


Рис. 17. Графическое изображение на $Id\alpha$ -диаграмме:

процессов теоретического горения топлива различной влажности W_0, W_1, W_2 ; максимальной энтальпии I_{\max} газов 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, β_1 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

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

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

Таким методом на заранее подготовленную Id -диаграмму, с температу-
рами 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 влаж-
ности топлива, и заканчивается на энтальпии $I_{\text{max}}=3100 \text{ кДж/кг} (740 \text{ ккал/кг})$.
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 ми-
нимальное 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

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

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

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 со-
стояния сушильного агента или, наоборот, рассчитывать содержание CO_2 по
известной энтальпии (см. рис. 9, б).

Таким образом, Id -диаграмма, дополненная вспомогательными линия-
ми W, CO_2, α , представляет в виде $Id\alpha$ -диаграммы необходимое пособие
для расчета и анализа процессов полного химического горения топлива и по-
следующей 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):

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

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, наносят на ее полях сверху и внизу концевые участки этих линий. В поле диаграммы значения g отсчитывают с помощью длинной линейки.

Расчетную $Id\alpha$ -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 $Id\alpha$ -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 $Id\alpha$ -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 $Id\alpha$ -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 отработанному, 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

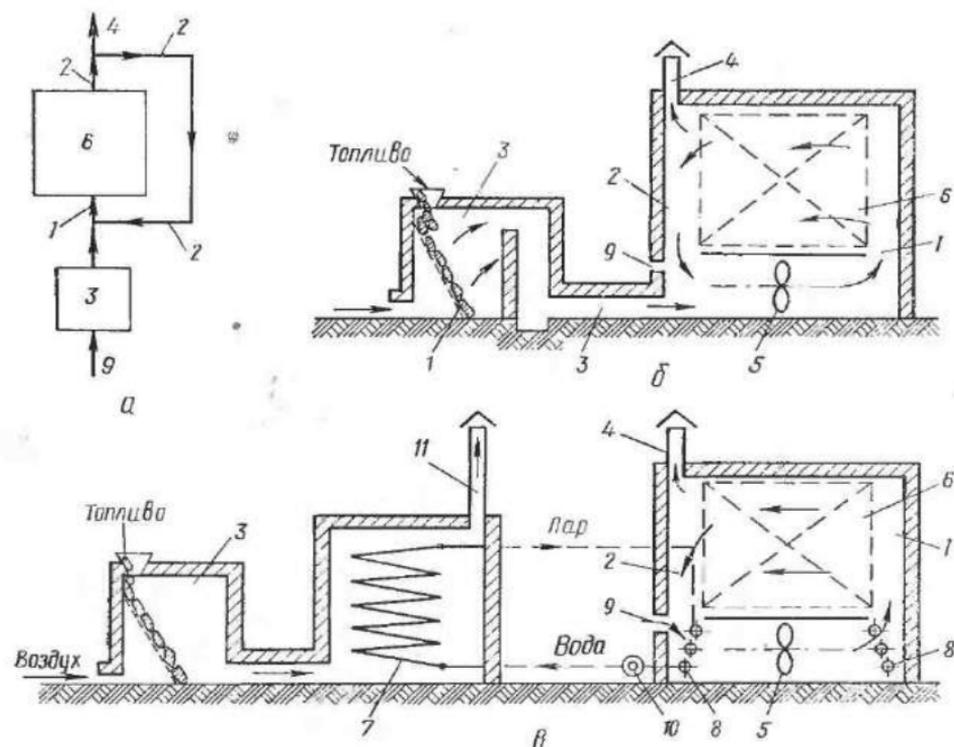


Рис. 18. Схема газовой и паровой сушильных установок:

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 — конденсатоотводчик; 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 теплотерь) горении топлива влажностью $W_0=0$, при $\alpha=1$. Охлаждение полученного газа B в результате теплотерь 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 теплотерь 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 теплотери $I_{\max}-I_1$ 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, a), 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, подсашиваемого 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, a). 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

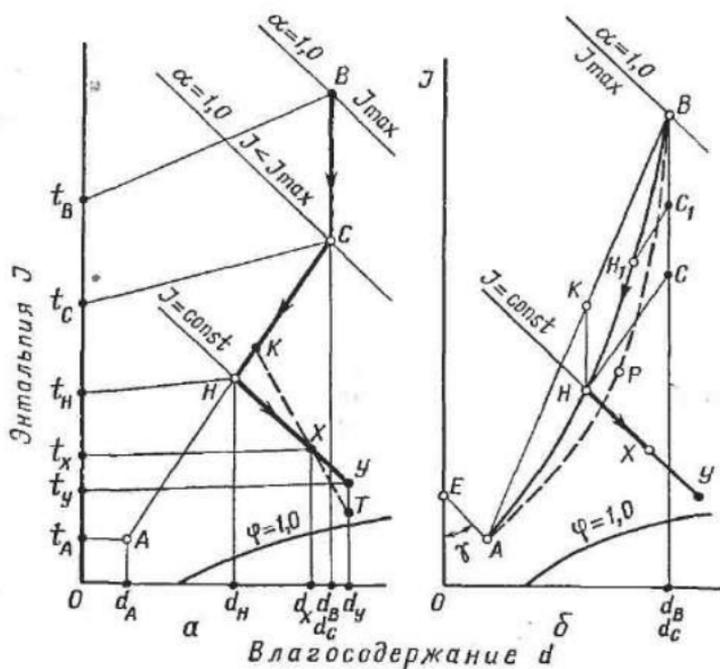


Рис. 19. Изменение состояния продуктов сгорания в сушильной установке: а — при сосредоточенных теплопотерях и добавке воздуха; б — при равномерном нарастании теплопотерь и добавке воздуха; BC — охлаждение газов через ограждения; CH — охлаждение и добавка холодного воздуха; HU — охлаждение при испарении 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 XY). 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 $Id\alpha$ -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 $Id\alpha$ -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 раскалиенных продуктов сгорания (по их массе) H (см. рис. 20)

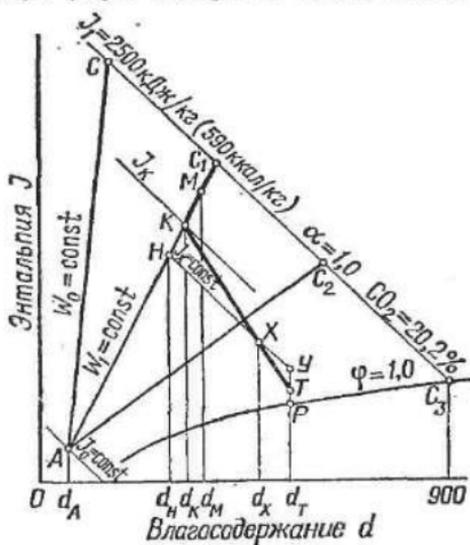


Рис. 20. Процессы на $Id\alpha$ -диаграмме:

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

характеризуется величиной отрезка $УХ$, а рециркулирующих из материала, отработанных газов $У$ — величиной отрезка $ХН$.

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 $ТХ$ до пересечения с линией $W_1 = \text{const}$, получим точку K состояния газа, которое требуется для образования смеси X при практическом процессе сушки $ТХ$.

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:

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

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

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

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

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

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 точка — газод — 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 туннелей 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 *Ida*-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.

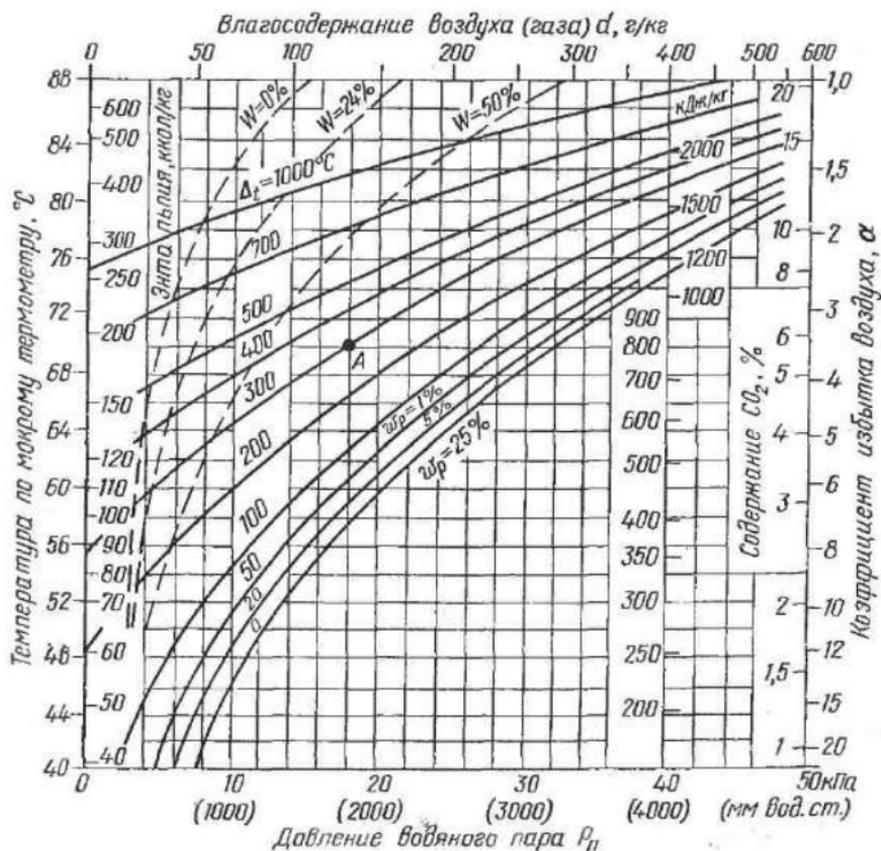


Рис. 21. Диаграмма $t_{m,p}$ параметров газов и сушильного агента в зависимости от температуры по мокрому термометру t_m и психрометрической разности Δt .

Диаграмма $t_{m,p}$ (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 , Δt , 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 , $\text{CO}_2 \alpha = \text{const}$.

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: $d = 135 \text{ г/кг}$ (вверху), $p_n = 17\,600 \text{ Па}$ (1800 мм вод. ст.) (внизу), точка росы $t_r = 57^\circ\text{C}$, $I = 818 \text{ кДж/кг}$ (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 $Id\alpha$ -диаграмме. Например, задано $t = 850^\circ\text{C}$, $d = 160 \text{ г/кг}$ или $p_n = 20\,700 \text{ Па}$ (2070 мм вод. ст.). Находят точку K (рис. 22) и по ней влажность сжигаемого древесного топлива $W = 50\%$, плотность газа $\rho = 0,299 \text{ кг/м}^3$ (шкала справа, вне диаграммы), удельный объем $3,93 \text{ м}^3/\text{кг}$ (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 $Id\alpha$ -диаграммы (вкладка — приложение 2). Для точки K получается $g = 0,19 \text{ кг/кг}$ 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):

$$t_p = 39,31 \lg \frac{92,1 + 1,678w}{0,072 + \alpha} - 26,8. \quad (96)$$

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]:

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

где c_B и c_B — 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 G .

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 I - d -диаграмме можно легко определить по замеренным значениям их температуры и содержанию CO_2 , согласно

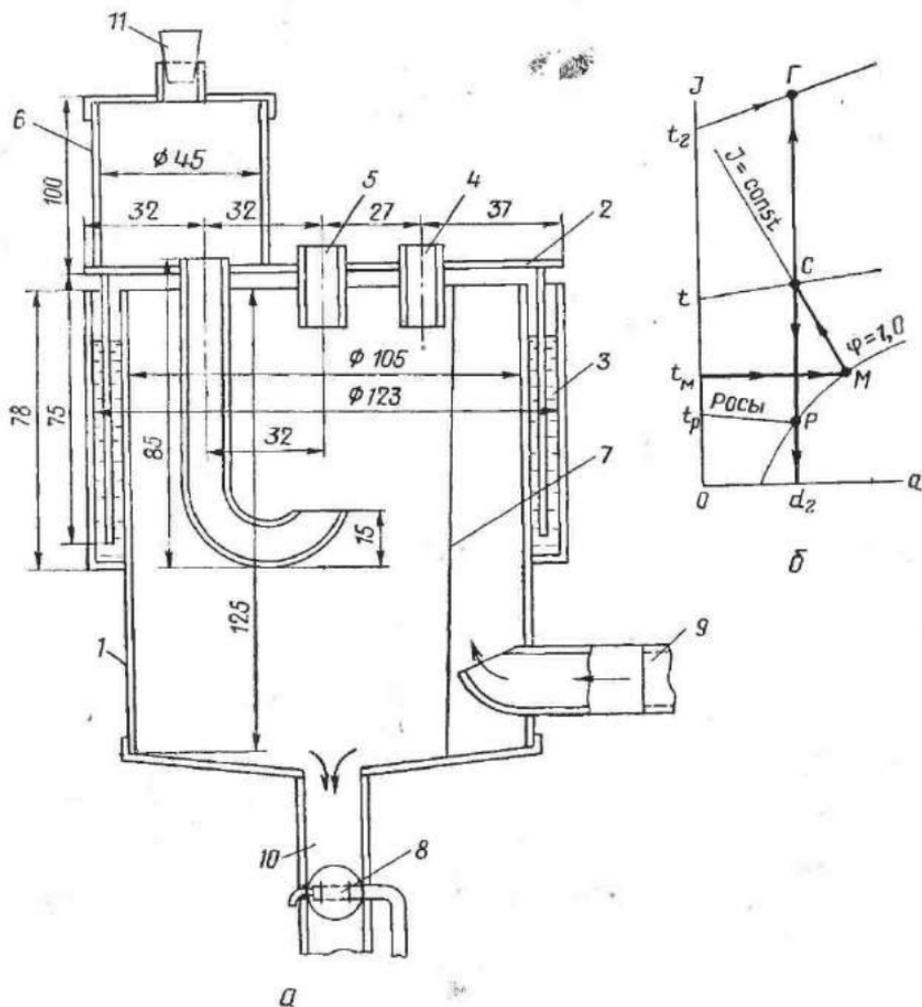


Рис. 23. Влагомер для продуктов сгорания:

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 теплопотерь 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 $I\alpha$ -диаграмме наносят отрезки BC (см. рис. 19, а), показывающие величину теплопотерь 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 топке 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 теплопотерь сушильного барабана, с учетом тепла на нагревание высушенной древесины. Общий процесс определится ломаной линией $TKCB$. И в этих условиях теплопотери 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 $У$ известна (задана или замерена), а направление отрезка $УН$ 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						Влажность, г/кг
	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	
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 влагосодержание 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 влагосодержания 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 линий 7 и 8 для древесины).

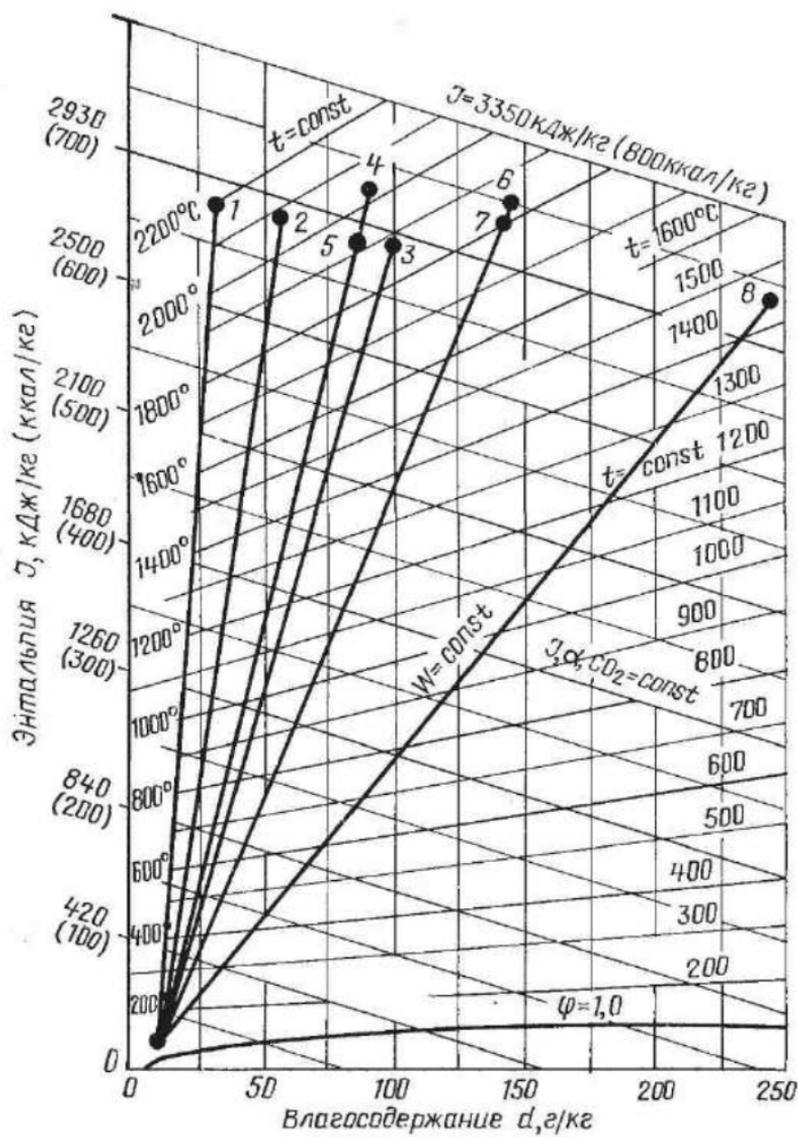


Рис. 24. Линии полного теоретического сгорания различных видов топлива на Ida -диаграмме:

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 *Ida*-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 —

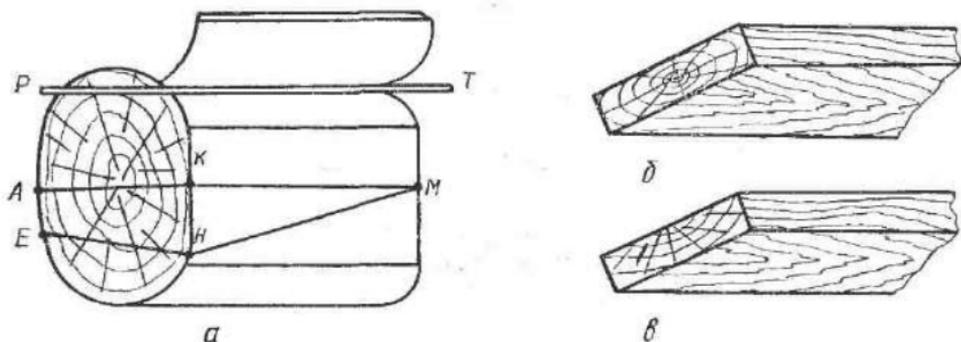


Рис. 25. Разрезы и способы выпилки досок по отношению к годовым слоям:

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

по радиусу годовых слоев, тангентальное — по касательной к годовым слоям (рис. 25, *а*) 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, *а*): 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 полосы, 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 сортикета 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 состоянию 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.

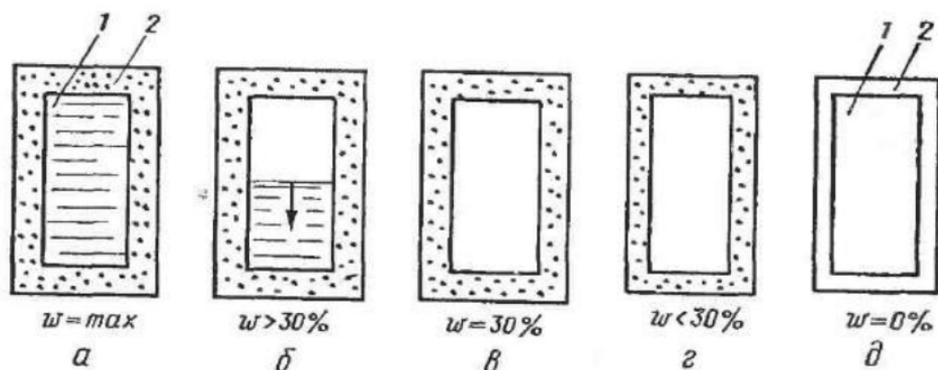


Рис. 26. Последовательное удаление влаги из клетки:

а — полость клетки заполнена влагой (свободной); *б* — часть влаги удалена из полости, оболочка клетки насыщена влагой; *в* — часть влаги удалена из оболочки, она частично сократилась; *г* — 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 вверху) 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].

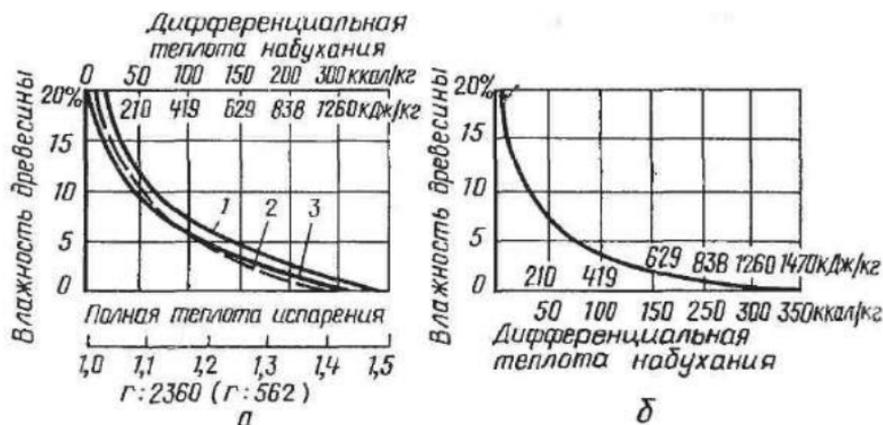


Рис. 27. Дифференциальная теплота сорбции влаги древесиной:

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: ω_p (φ, t). Как в уравнении (3), φ и здесь показывает состояние пара. Абсолютно сухая часть воздуха

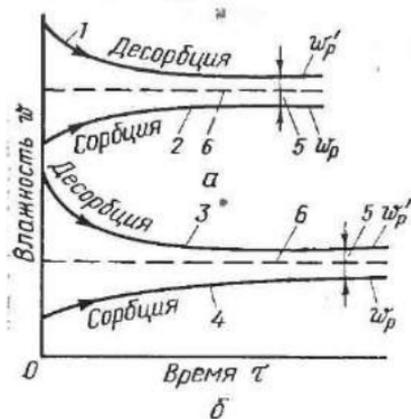


Рис. 28. Кривые выравнивания влажности древесины во времени:

а — во влажном воздухе; б — в сухом воздухе; 1 — проба с высокой начальной влажностью; 2, 3 — пробы с пониженной 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 величины 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 $w_p \varphi t$ — диаграмма (см. рис. 29), показывающая закономерную зависимость между ее параметрами. В правой части диаграммы между двумя изотермами 100°С выявляется область неустойчивого состояния

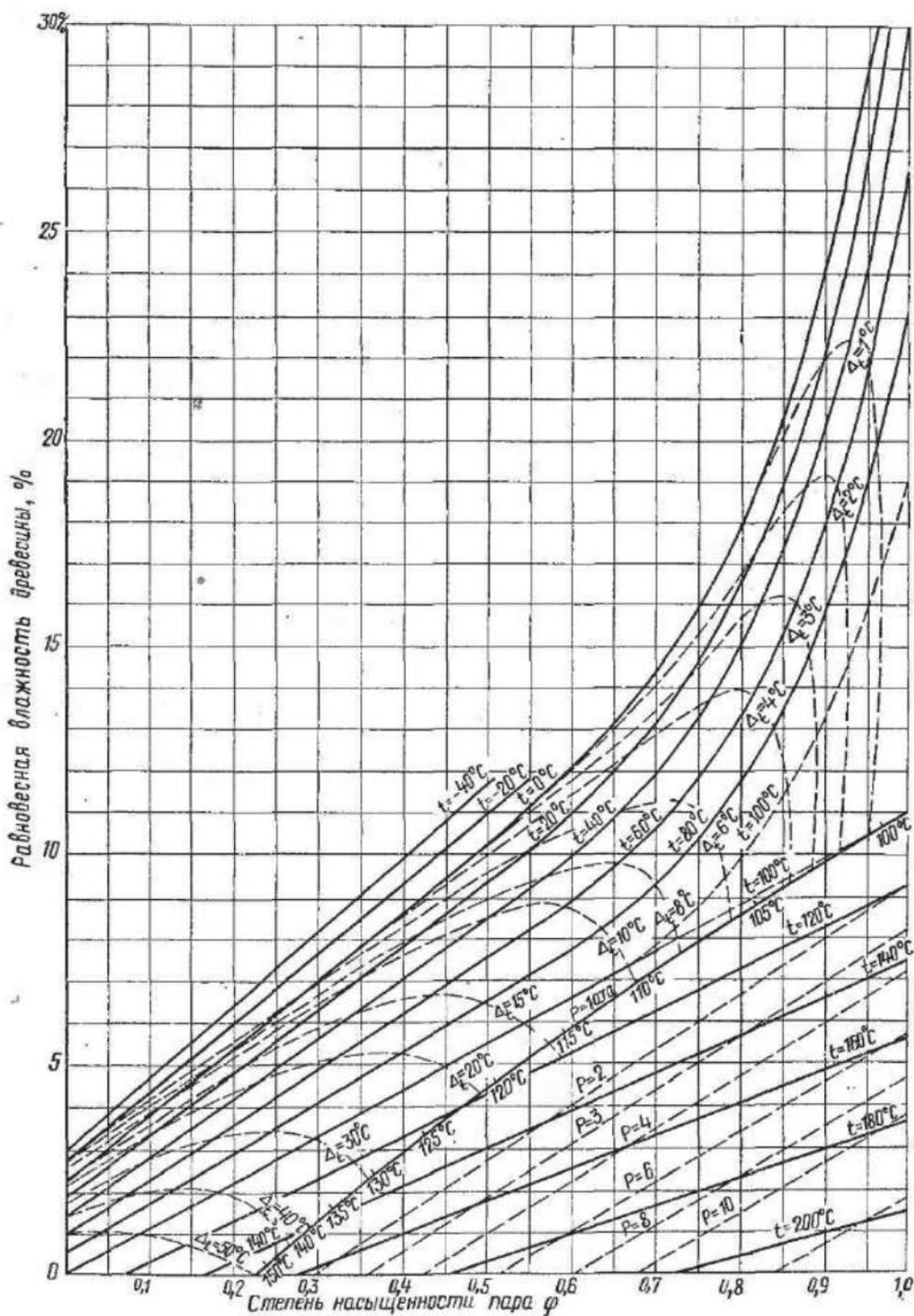


Рис. 29. Исходная диаграмма равновесной влажности древесины в координатах $\omega_{p\phi}$

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 $\omega_p t$ -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 статики 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

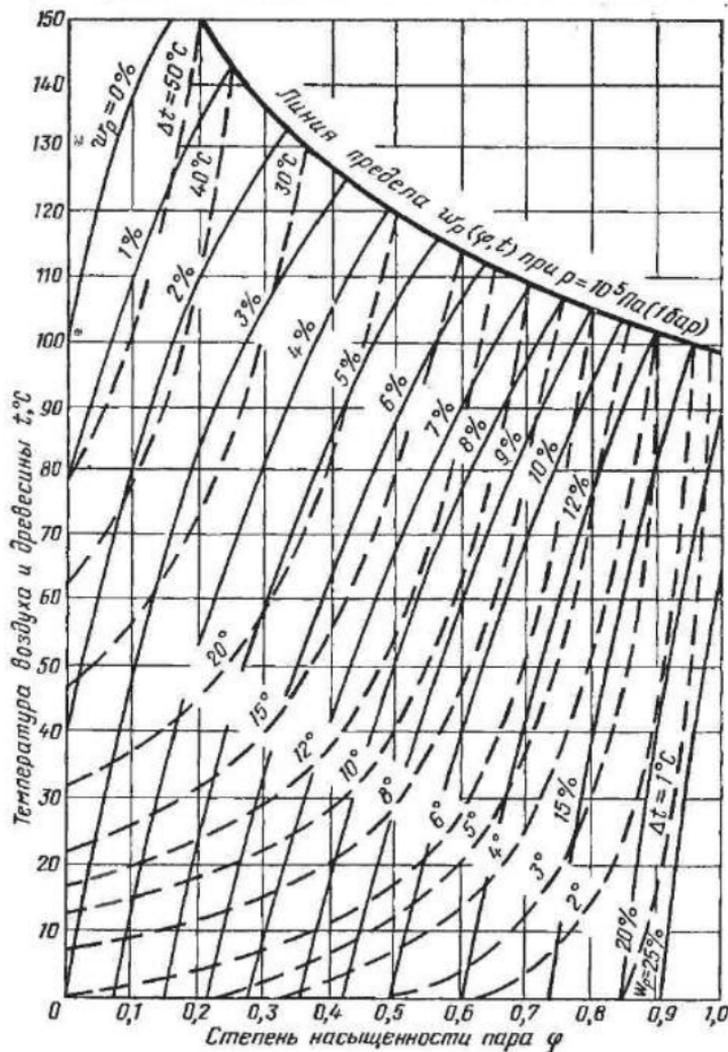


Рис. 30. Диаграмма равновесной влажности древесины в координатах $t\varphi$ линии равновесной влажности древесины. Расширенная таким образом диаграмма отражает свойства воздуха как сушильного агента и основное свойство древесины (ω_p) как объекта сушки. Она удобна в проектной и исследовательской работе.

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

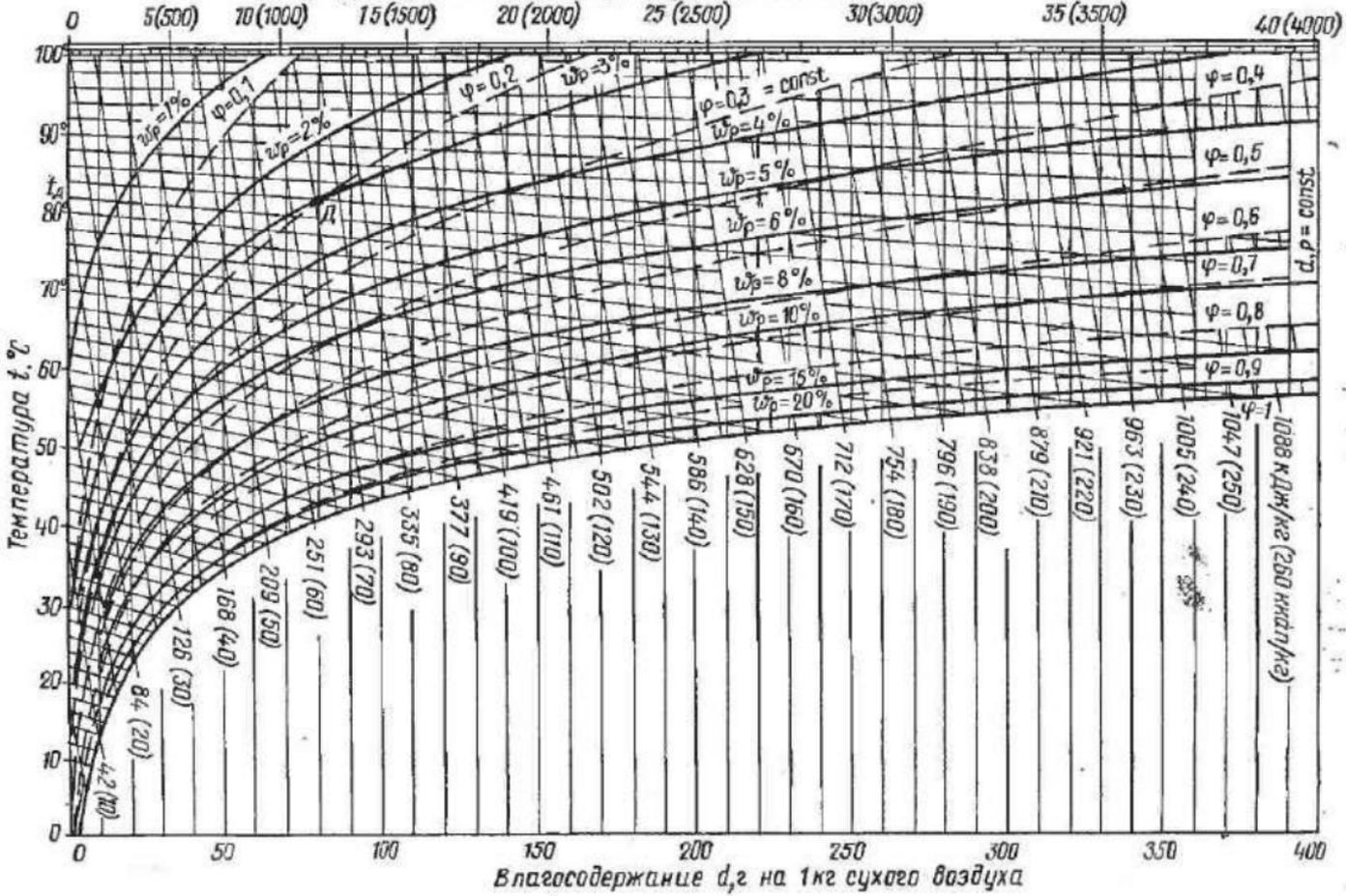


Рис. 31. I_d -Диаграмма, дополненная линиями равновесной влажности древесины

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-

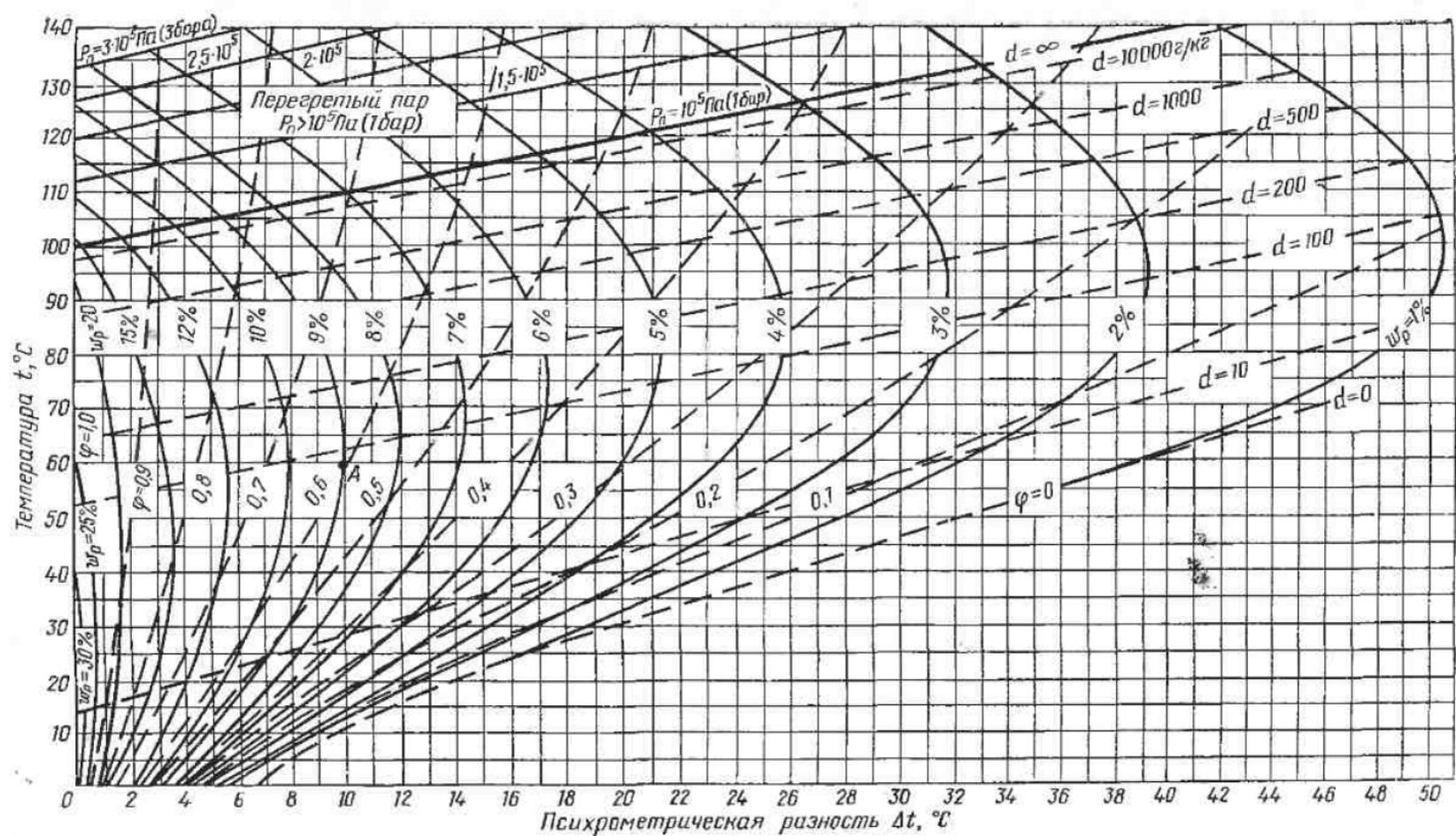


Рис. 32. Диаграмма равновесной влажности древесины в координатах $t \Delta t$.

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

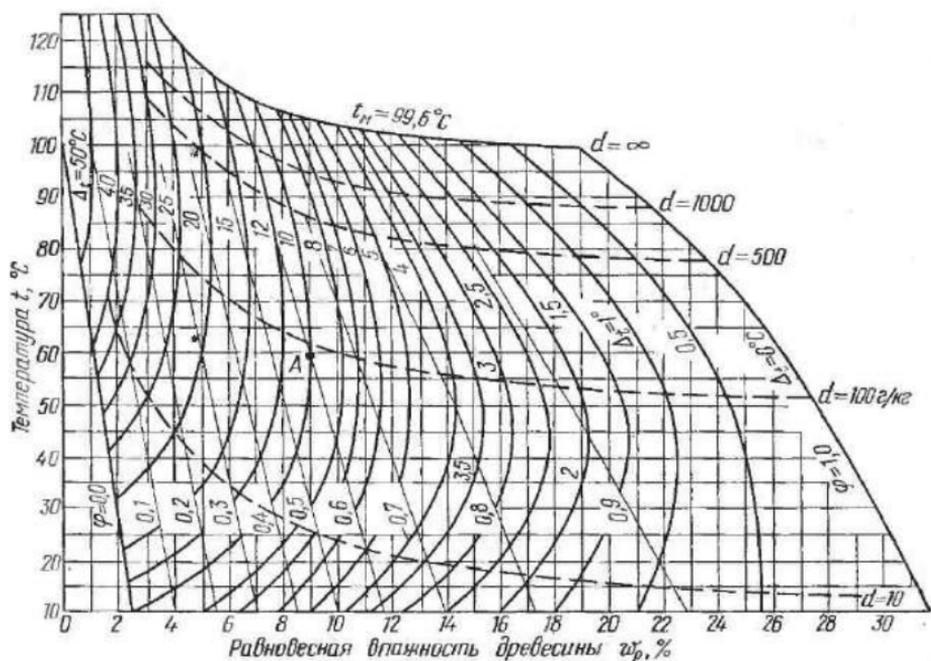


Рис. 33. Диаграмма равновесной влажности древесины в координатах $t\omega_p$

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

усредненных 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.

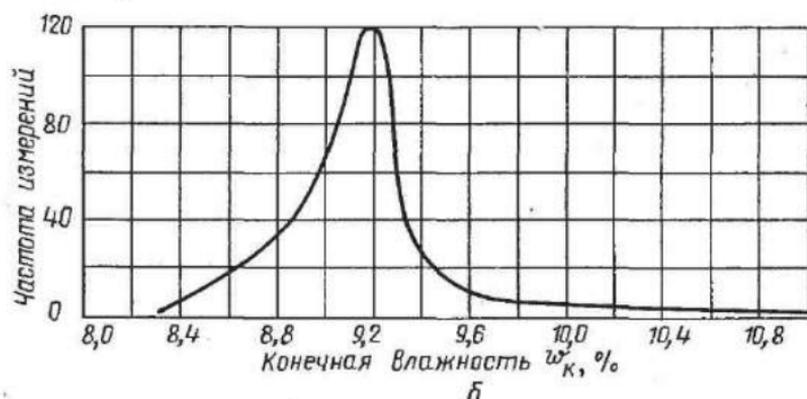
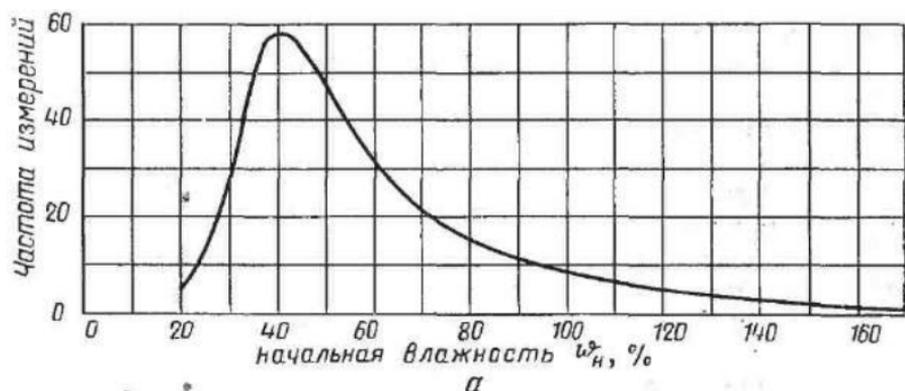


Рис. 34. Отклонения влажности древесины в различных сосновых досках толщиной 40 мм от средней влажности:

а — до сушки; б — после туннельной 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 металлोलите.

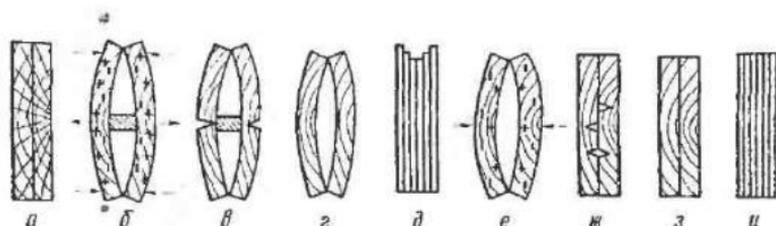


Рис. 35. Схемы упруго-вязких деформаций древесины во время сушки

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

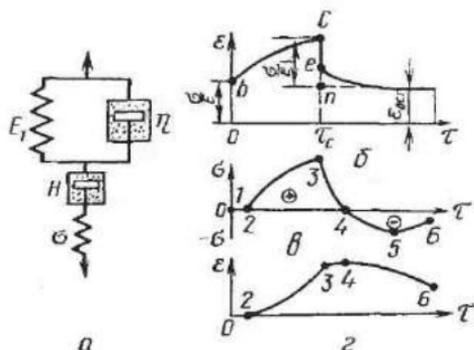
$$\tau = \eta / (E_1 + H) = Ae^{-\frac{U}{kT}}, \quad (106)$$

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); σH — 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

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

При замедлении скорости нагружения $\epsilon_{\text{ост}}$ 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_u	радикальный	тангентальный	объемный	ядровой или спелой	заболонной
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:

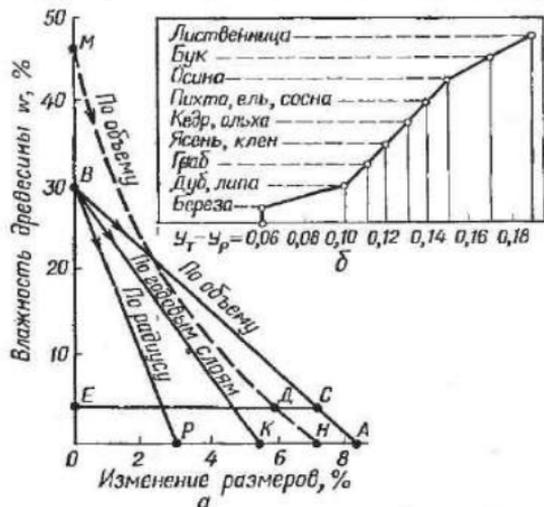
$$U_\alpha = U_p + (U_T - U_p) \cos^2 \alpha, \quad (114)$$

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 ма-



териалов в поверхностной их 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.

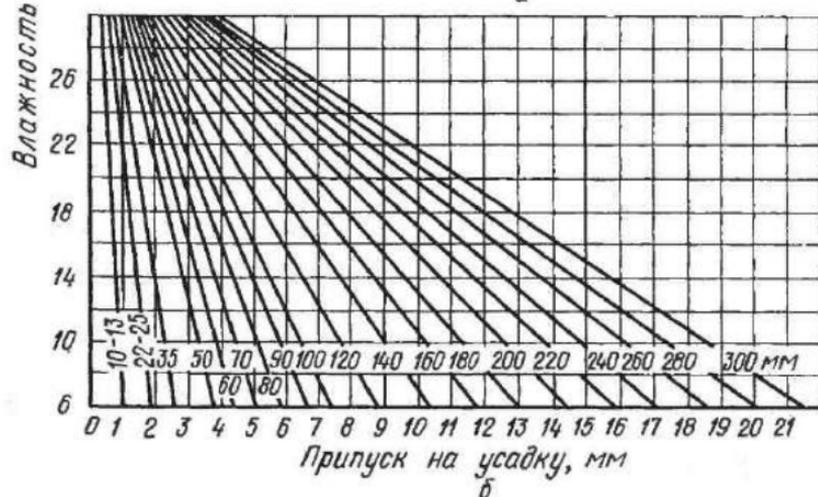
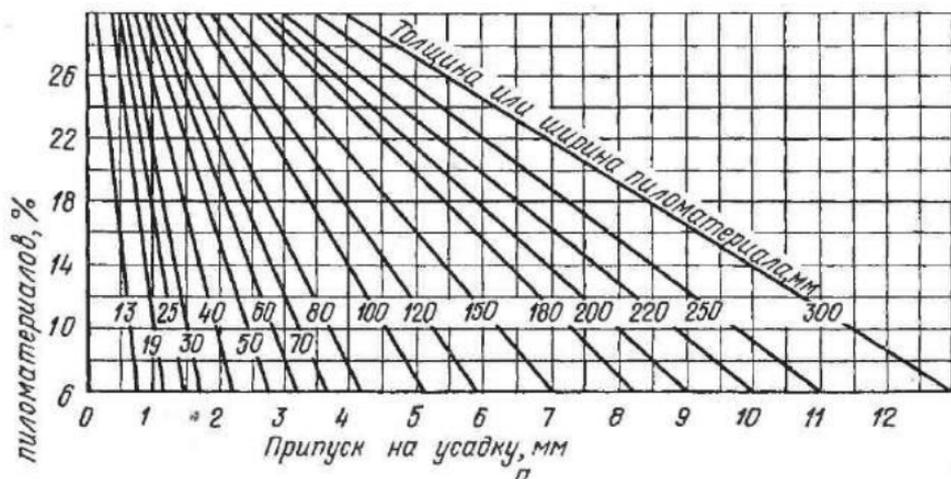


Рис. 38. Диаграммы припусков на усадку пиломатериалов: а — хвойных пород (кроме лиственницы); б — некоторых лиственных пород

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 $U_t - U_p$ — 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

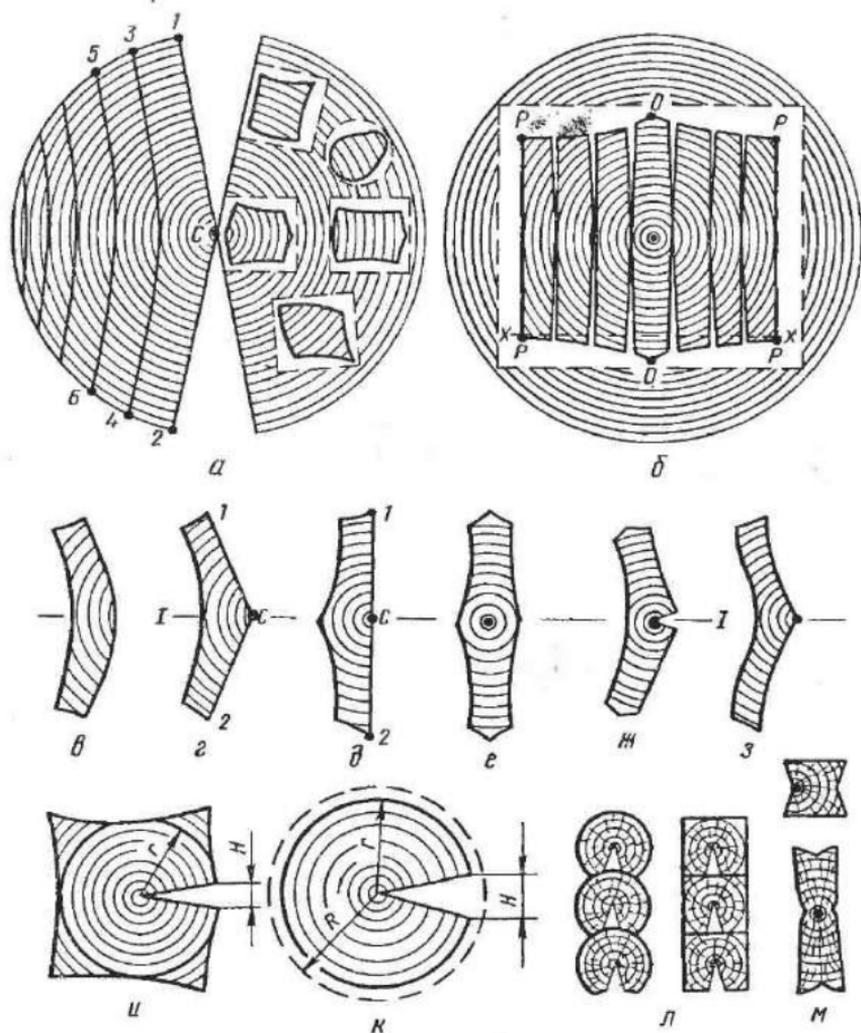


Рис. 39. Поперечные деформации сортиментов древесины из-за ее усушки: а — вырезанных в разных зонах бревна; б — разных досок в поставе; в, г — при свободном деформировании боковой и центральной доски в поставе; д — в зажатом состоянии центральной доски; е, ж — сердцевинной доски без растрескивания и 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 пласти) 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 кромкам) между досками не возникнет зазоров, — все торцовые кромки медленно высушенных досок полубревна плотно сомкнутся. Пропилы 1—С и С—2 прямолинейные, а остальные по гиперболическим кривым с вершиной гипербол против сердцевины бревна.

Наибольшая удельная усушка по ширине обнаружится у боковых досок, а наименьшая — у сердцевинной. По толщине, наоборот, наибольшая усушка возникнет у кромок сердцевинной и несколько меньшая — у двух центральных досок (с сердцевиной на их пласти); наименьшие отклонения усушки по толщине будут у крайней боковой доски.

Величина свободной поперечной покоробленности доски характеризуется стрелой f (мм), определяемой по формуле А. В. Гадюлина [19]:

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

где b — половина ширины доски, мм; r — радиус годового слоя, касательного к измеряемому пропилу, мм; $Y_T - Y_P$ — разность 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

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

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

В правой части сечения бревна (рис. 39, а) пунктиром показана деформация брусков квадратного сечения. Брусок, примыкающий к сердцевине, примет в целом клиновидную форму, поскольку у правой его грани направление годовых слоев ближе к тангентальному, следовательно, эта грань больше сократится, чем левая, к которой годовые слои примыкают радиально. Обращает внимание симметричный гребень посередине правой грани, обусловленный радиальным направлением горизонтальной оси бруска, проходящей через вершину гребня и сердцевину. Верхняя и нижняя грани бруска приобретут вогнутую форму, аналогично вогнутой кривой 3—4 у центральной доски.

Брусок, расположенный справа в результате сушки получит 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 отдельно 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 $0-P$ и две внизу. Их вершина 0 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 высушенной 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), высушенной 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 достаточно растягивается, а в тангентальном упрессовывается. 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) плоть 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 бревно (рис. 39, *а*) высушенный и остроганный до квадратной формы брусок, а также строганая в сухом состоянии сердцевинная доска (рис. 39, *е*) при увлажнении изменяет 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 лушеного 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-

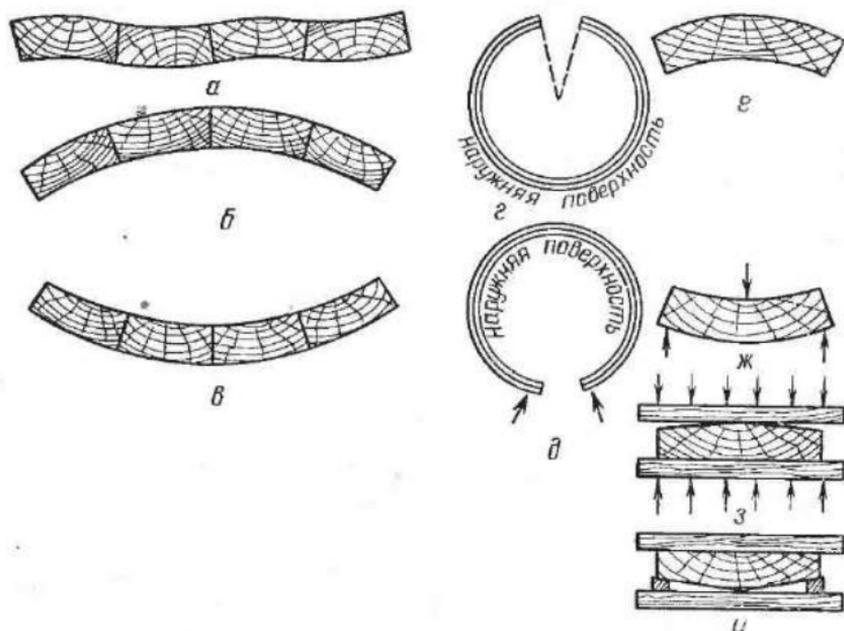


Рис. 40. Поперечная деформация древесины:

а — в щите 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 пласть (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

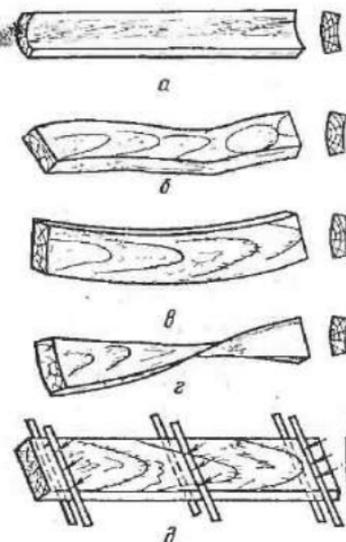
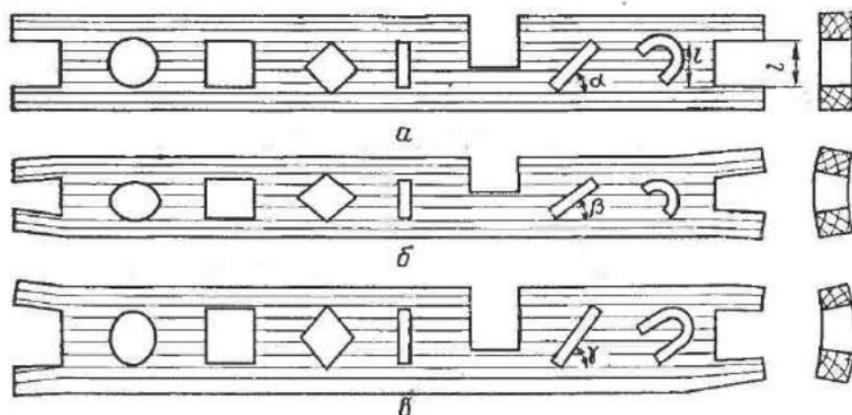


Рис. 42. Изменение формы отверстий в деталях:

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-

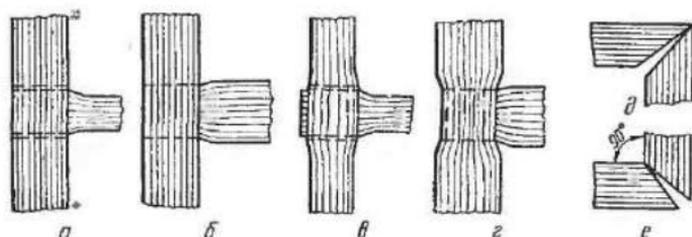


Рис. 43. Деформация шипового соединения:

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 недо-сушена, в готовом изделии постепенно уменьшается глубина гнезда (рис. 43, в). По мере усадки древесины такое соедине-ние ослабляется и разрушается. В изделии, изготовленном из сухой древесины, во влажной среде, например в неотапливае-мых помещениях, происходит ее разбухание (рис. 43, г). На рис. 43, д показаны результаты усадки, а на рис. 43, е — разбу-хания 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), жид-кой влаги и воздуха. На рис. 44 показано объемное содержание

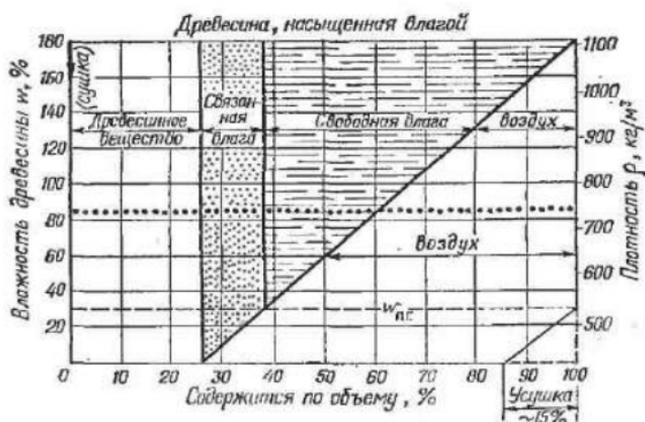


Рис. 44. Объемное содержание в древесине при различной ее влажности древесинного вещества, свободной влаги, связанной влаги и воздуха

(в %) в древесине свободной и связанной влаги, а также воз-духа, 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 $w_{п.г.}$, когда свободной влаги нет, и нижняя горизонталь (ось абс-цисс) показывает нулевую влажность, т. е. нет также и связан-ной влаги. Процесс сушки соответствует направлению по орди-нате 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,

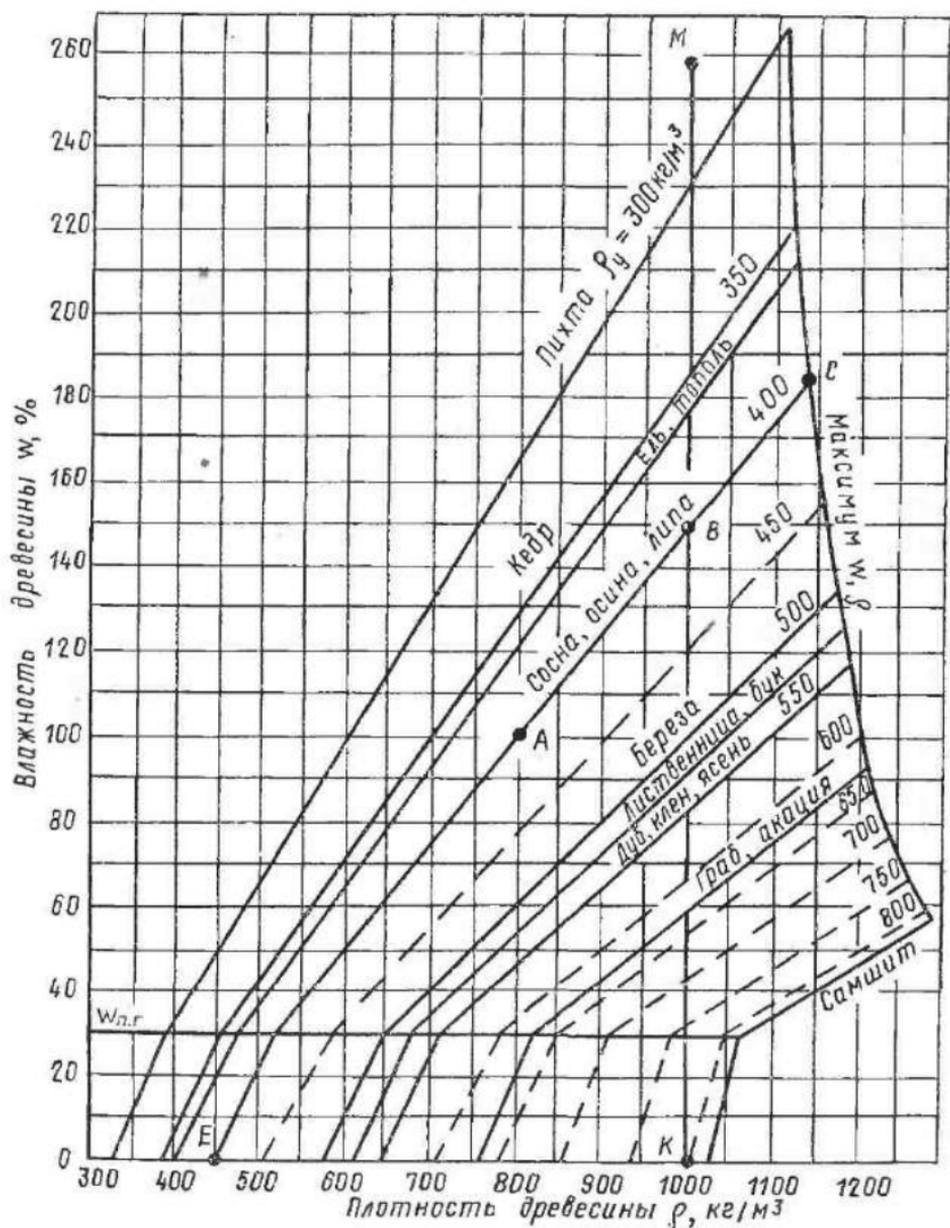


Рис. 45. Плотность древесины в зависимости от ее влажности:

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 $w'_p(\varphi)$ устанавливают 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 $\omega_p > 8\%$) теплота адсорбции будет ниже 125 кДж/кг влаги (30 ккал/кг), т.е. менее 5% от теплоты испарения.

При $\omega_p = \text{const}$ 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:

$$dQ/dw = [4,19 \cdot 597 / (w + 1,7)] - 20. \quad (122)$$

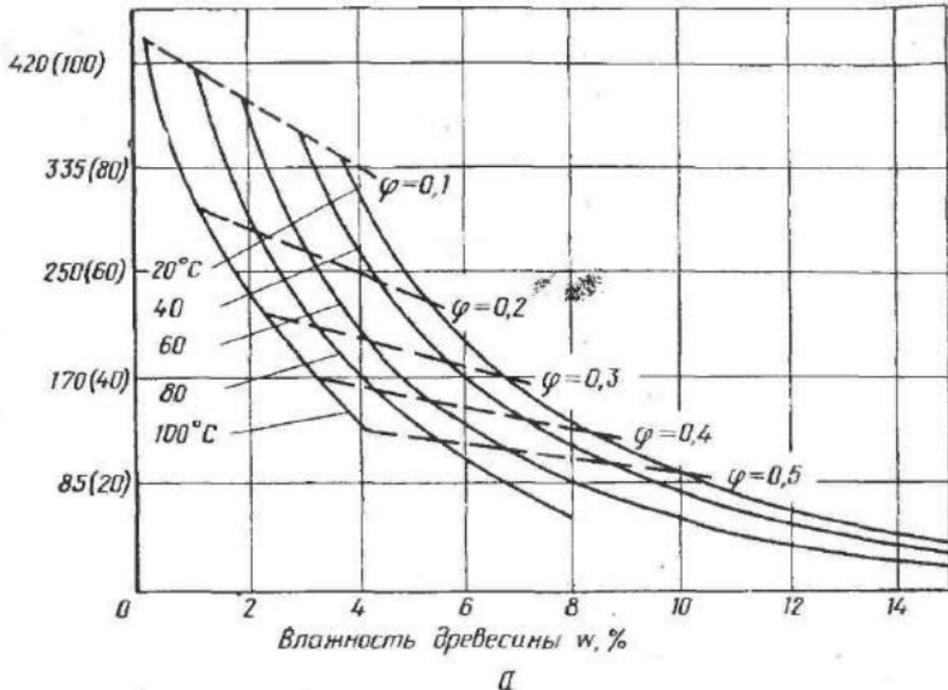
При влажности w поверхности материала более 20% величина dQ/dw небольшая и может не рассматриваться в технических расчетах; при жестких режимах сушки эта величина может быть значительной, например при высушивании стружки или тонких сортиментов. В полулогарифмических координатах зависимости (99) и (122) 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, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ \text{C})$ [или $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ \text{C})$ 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 $3,34 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ \text{C})$ [$0,80 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ \text{C})$].

Теплота адсорбции, кДж/кг (ккал/кг)



Дифференциальная теплота набухания, кДж/кг (ккал/кг)

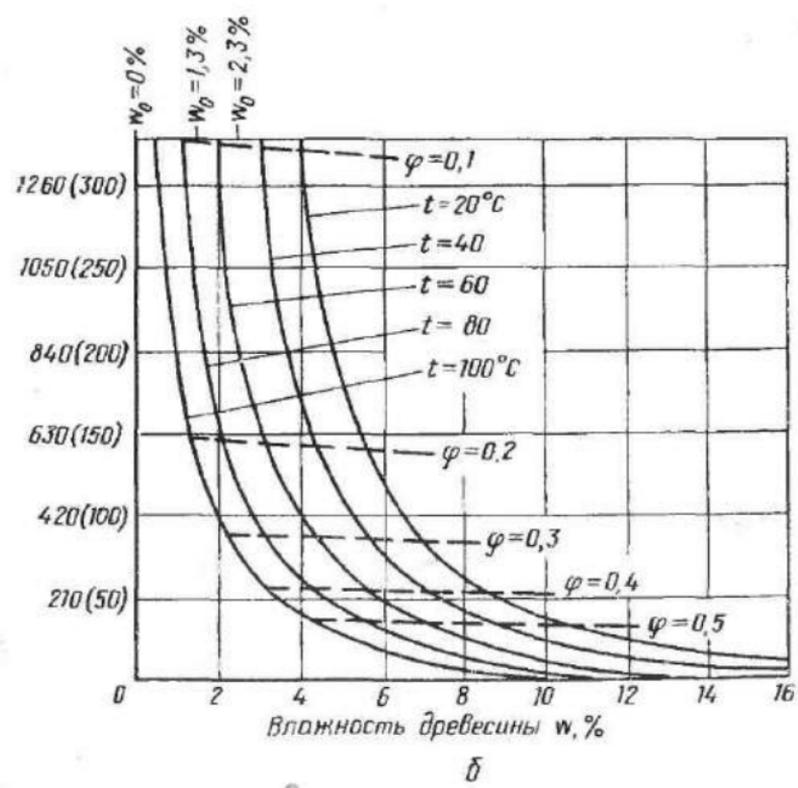


Рис. 46. Диаграммы:

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:

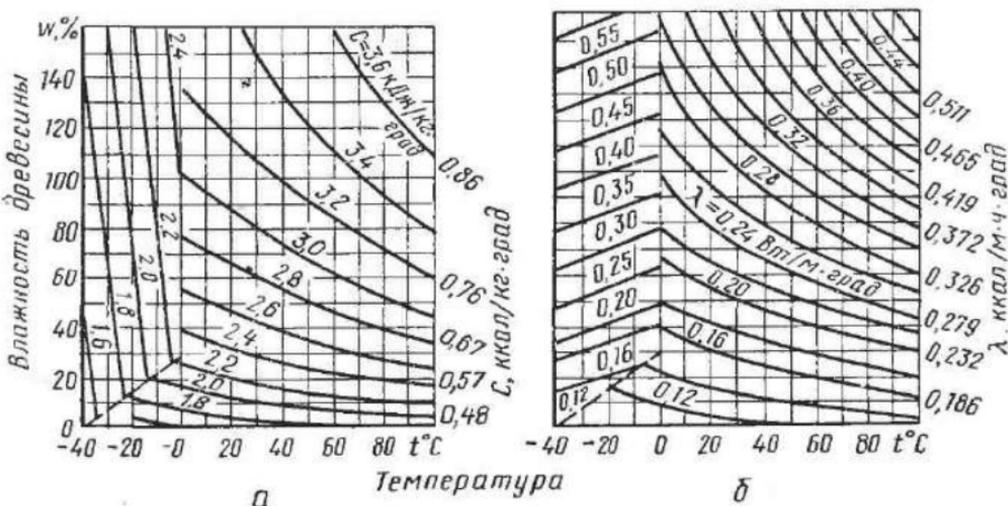


Рис. 47. Диаграммы:

а — коэффициента удельной теплоемкости древесины c_d , ккал/(кг·град); б — коэффициента теплопроводности древесины λ ккал/(ч·м·град)

Плотность древесины ρ_y	300	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):

$$a = \frac{\lambda}{\rho r} \left(\frac{\text{кДж}}{\text{ч} \cdot \text{м} \cdot ^\circ\text{С}} \cdot \frac{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{м}^3}{\text{кДж} \cdot \text{кг}} = \text{м}^2/\text{ч} \right). \quad (124)$$

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

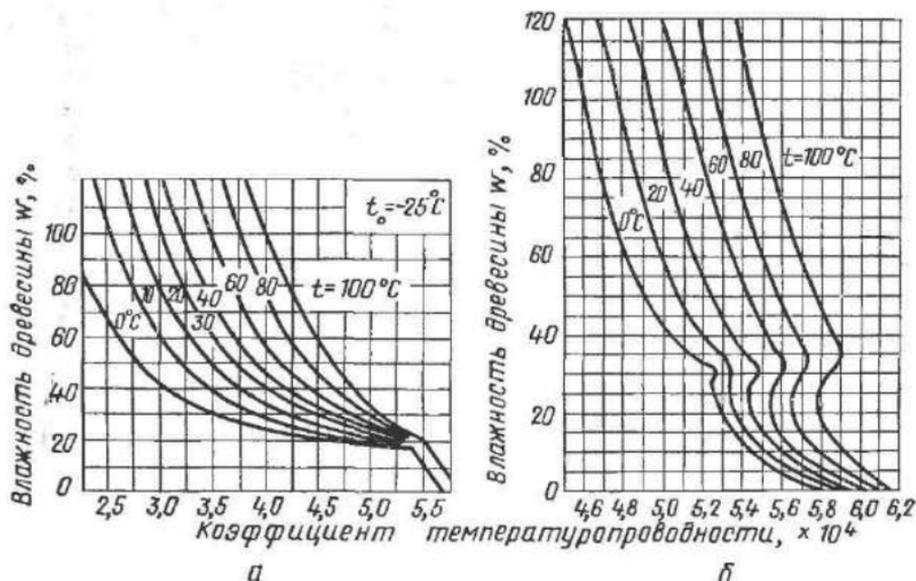


Рис. 48. Коэффициенты температуропроводности поперек волокон древесины при $\rho_y = 515 \text{ кг/м}^3$:

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 ($\Delta l/l =$

$=11 \cdot 10^{-6}$), 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:

$$E_w = F_{12} [1 - (w - 12)]. \quad (125)$$

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).

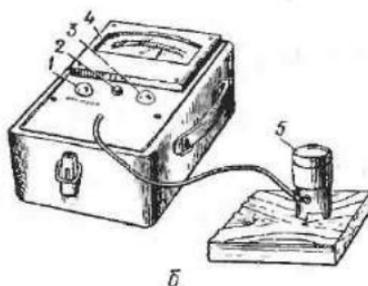
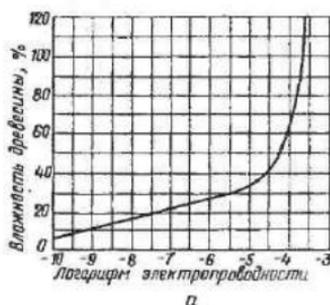


Рис. 49. Электропроводность древесины и ее применение для измерения влажности:

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 пластъ 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 $\sigma_{пр}$ снижается [17] тем больше, чем выше влажность древесины (0—25%) и ее температура (от 50 до 90° С):

$$\sigma_{пр} = a - bt. \quad (126)$$

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°C 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 снижается прочность древесины на скалывание и раскалывание. После значитель-

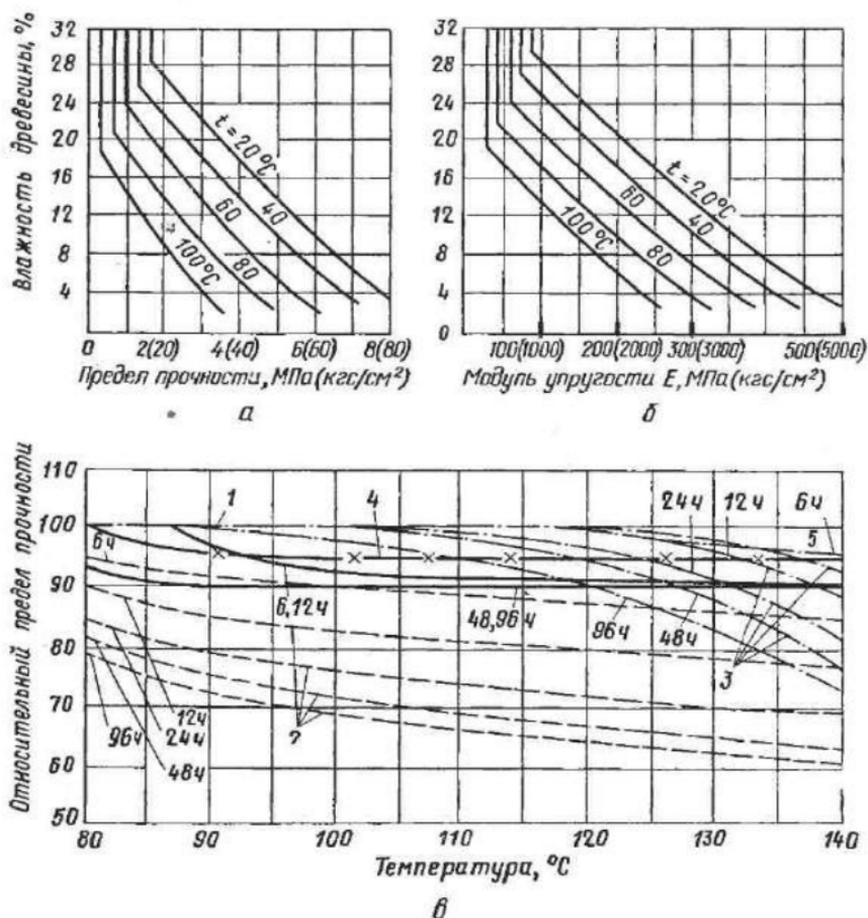


Рис. 50. Изменение прочностных показателей древесины при влажностном и температурном воздействиях:

а — предел прочности нагретой березы при растяжении в тангентальном направлении; б — модуль упругости нагретой березы в тангентальном направлении; в — предел прочности нагрывавшейся 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 сортамента; 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

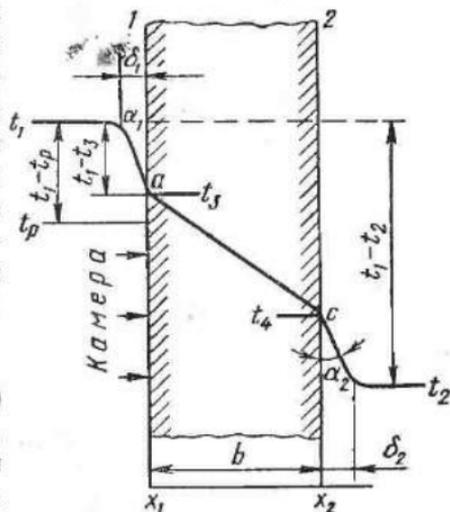


Рис. 51. Теплопроводность через плоскую однослойную стенку при стационарном режиме

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)], м²/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:

$$\text{для нагревания тела } \Theta = (t_{cp} - t)/(t_{cp} - t_0), \quad (132)$$

$$\text{для охлаждения тела } \Theta_{ок} = (t - t_{cp})/(t_0 - t_{cp}), \quad (133)$$

где t_{cp} — 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 $t_{cp} - t_0$, а при охлаждении $t_0 - t_{cp}$. 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 теплопроводности и 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

стоянная 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 (пропиточном, каменноугольном масле, нагретом петролатуме и т. д.) насыщенным паром, а также контактированием материала с горячими металлическими поверхностями.

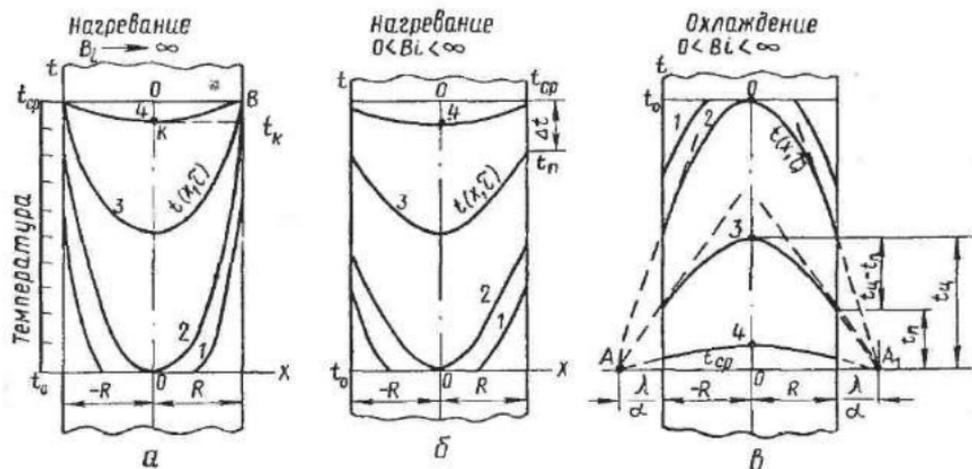


Рис. 52. Кривые последовательного 1, 2, 3, 4 распределения температур при двустороннем теплообмене плоского тела в условиях регулярного режима: а — нагревание при $Bi \rightarrow \infty$; б — нагревание при $0 < Bi < \infty$; в — охлаждение при $0 < Bi < \infty$

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 сортифта (график справа — в полулогарифмической анаморфозе).

Метод расчета продолжительности нагревания пиломатериалов с известными R и a следующий. Задаются температурой среды $t_{\text{ср}}$ 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):

$$\theta = (t_{\text{ср}} - t)/(t_{\text{ср}} - t_0) = (80 - 76)/(80 - 10) = 0,057.$$

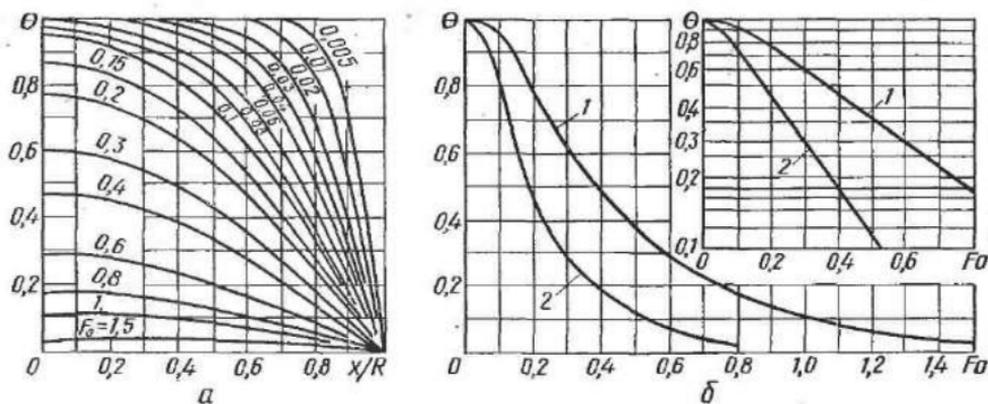


Рис. 53. Зависимость между критерием Фурье Fo и безразмерной температурой θ при нагревании:

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; $t_{\text{ср}} = 80^\circ\text{C}$; $t_0 = 10^\circ\text{C}$. 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

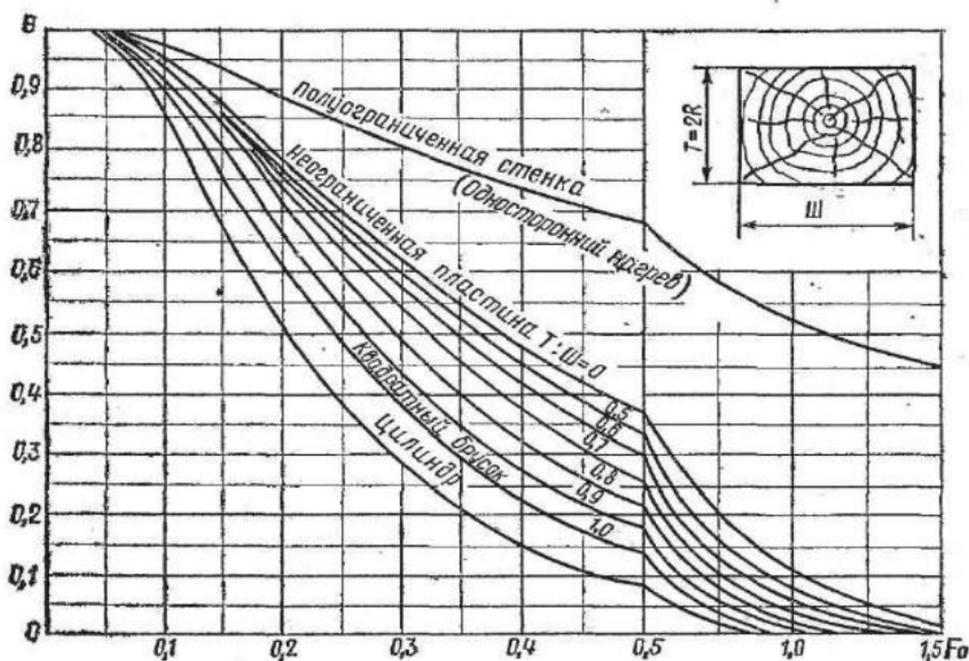


Рис. 54. Диаграмма для расчета нагревания досок, брусков и цилиндрических сортифтов на их оси

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

$$\alpha = 6,2 + 4,2v \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 5,3 + 3,6v \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С}) \quad (137)$$

при $v > 5$ м/с

$$\alpha = 7,1v^{0,78} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 6,5v^{0,78} \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С}), \quad (138)$$

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):

$$\text{Nu} = A \text{Re}^n, \quad (139)$$

где A и n — коэффициенты, зависящие от рода материала и величины критерия Рейнольдса Re [29]:

при $\text{Re} = 200 \dots 25\,000$ $A = 0,385$ и $n = 0,57$;

„ $\text{Re} = 25\,000 \dots 70\,000$ $A = 0,102$ и $n = 0,73$;

„ $\text{Re} = 70\,000 \dots 315\,000$ $A = 0,025$ и $n = 0,90$.

На диаграмме в логарифмических координатах (на логарифмической бумаге) это уравнение покажет прямую. Действительно, логарифмируя его, получим $\lg \text{Nu} = \lg A + n \lg \text{Re}$, или применительно к логарифмической анаморфозе уравнение прямой $y = B + nx$. Значение n представляет тангенс угла α наклона прямой к оси абсцисс. Постоянная $A = \text{Nu}/\text{Re}^n$ удовлетворяет любой точке прямой. Затем из соотношения (см. табл. 7) $\text{Nu} = \alpha l/\lambda$, 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]:

$$\text{Nu} = 0,6\text{Re}^{0,5}. \quad (140)$$

Продолжительность нагревания или охлаждения пластин, в частности досок, в газообразной среде при $\text{Bi} < \infty$ 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 $\text{Bi} = \infty$.

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/(м²·°С) [0,18 ккал/(м·ч·°С)], коэффициент теплообмена $\alpha = 7$ Вт/(м²·°С) [6 ккал/(м²·ч·°С)], коэффициент температуропроводности $a = 0,0065$ м²/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

$$\text{Bi} = \alpha R/\lambda = 7 \cdot 0,03/0,21 = 1.$$

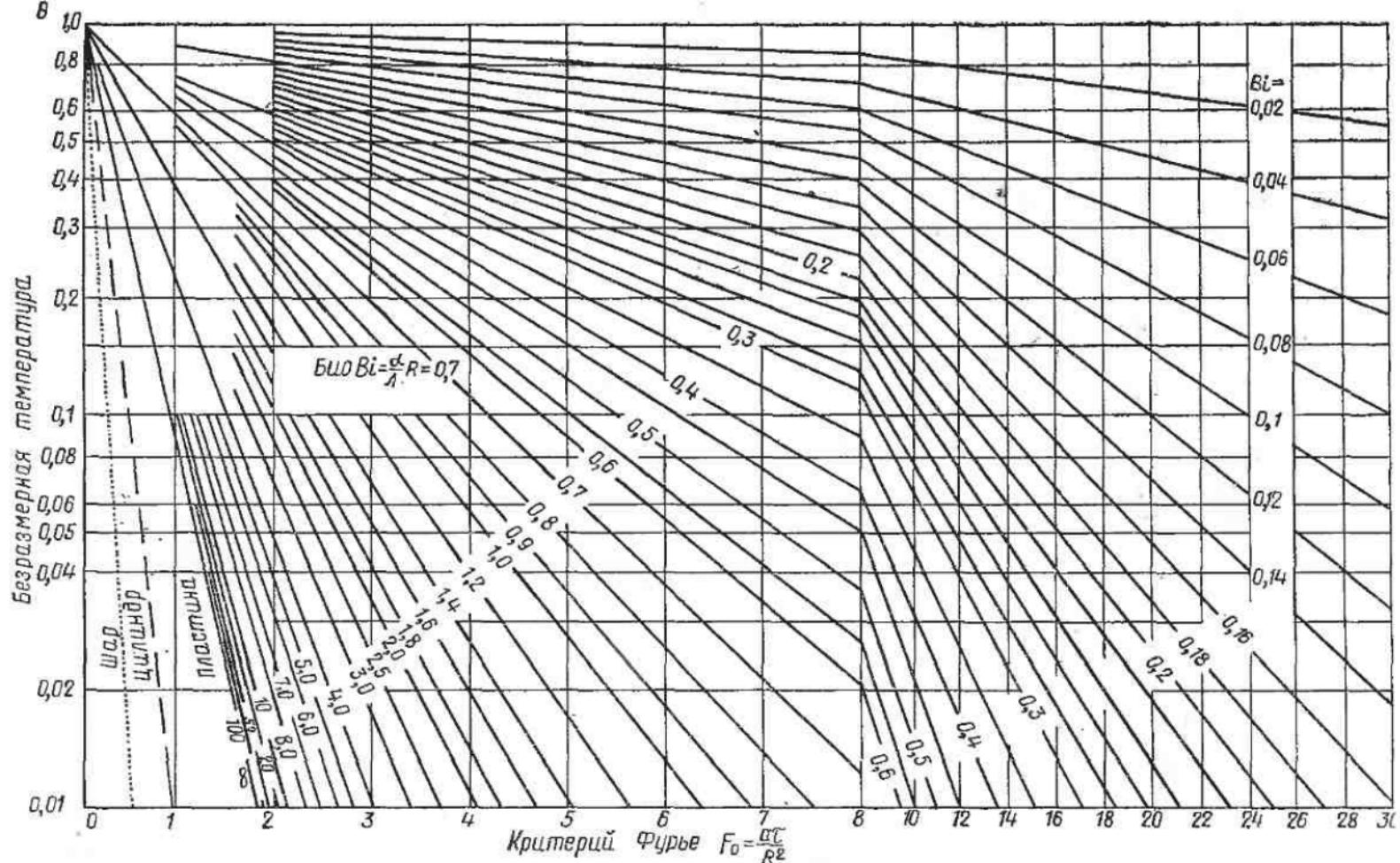


Рис. 55. Графическая зависимость $Fo(\theta, Bi)$ для середины неограниченной пластины

На оси ординат найдем $\Theta=0,14$ и, перемещаясь по горизонтали до наклонной линии $Bi=1$, отсчитаем вниз $Fo=2,8$. 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 *АВ* соответствует теплоте подогрева самой древесины и льда и теплоте, израсходованной на плавление льда, получившегося из гигроскопической жидкости от заданной начальной температуры (в точке *А* показано -40°C) до 0°C для 1 кг влажной древесины. Отрезок *ВС* характеризует теплоту плавления льда, *СЕ* — теплоту нагревания влажной древесины от 0°C до требуемой температуры (например в точке *Е* 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 KHX — 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 $УНК$ 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,

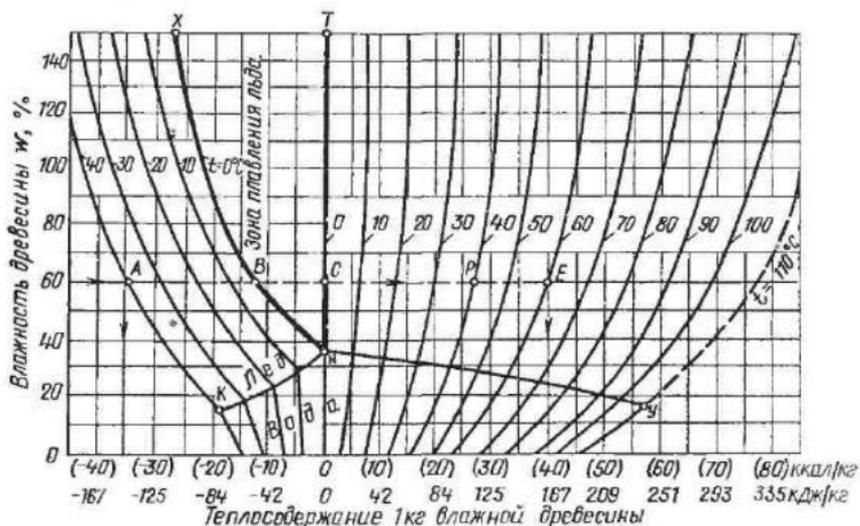


Рис. 56. Диаграмма для определения расхода тепла на нагревание 1 кг древесины с влагой

что плотность древесины сосны при влажности 60% равна 650 кг/м^3 . Следовательно, искомый расход тепла $314 \cdot 650 = 204 \text{ МДж/м}^3$ ($49\,000 \text{ ккал/м}^3$).

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 $60\text{--}80\%$, 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:

$$\tau_1 = \frac{FoR^2}{a} \cdot \frac{AE}{AE - CB} = \frac{FoR^2 q}{a(q - q_n)} \quad (142)$$

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

$$\tau_1 = \frac{FoR^2 q}{a(q - q_n)} = \frac{4,2 \cdot 0,03^2 \cdot 75}{0,0005(75 - 11)} = 8,9 \text{ ч.}$$

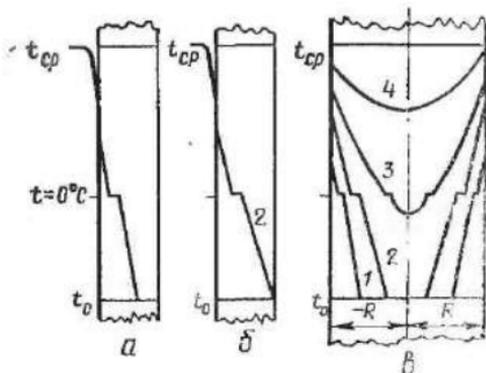


Рис. 57. Температурные кривые по толщине размораживаемых досок

Продолжительность только нагревания этих досок при тех же начальных и граничных условиях (величины a здесь близки между собой в среднем за весь процесс):

$$\tau = FoR^2/a = 4,2 \cdot 0,03^2/0,0005 = 7,6 \text{ ч},$$

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) $p_n - p_n = \Delta_t(65 - 0,0006p_n)$ Па [$\Delta_t(6,5 - 0,0006p_n)$ 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

$$I = c_1 \Delta_t (65 - 0,0006p_n) = [c \Delta_t (6,5 - 0,0006p_n)] \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}. \quad (144)$$

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 I_d -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·ч).

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 Idw_p -диаграммы, на которой в верхней части нанесена шкала давлений пара p_n , а в поле диаграммы показаны линии равновесной влажности древесины (см. рис. 31).

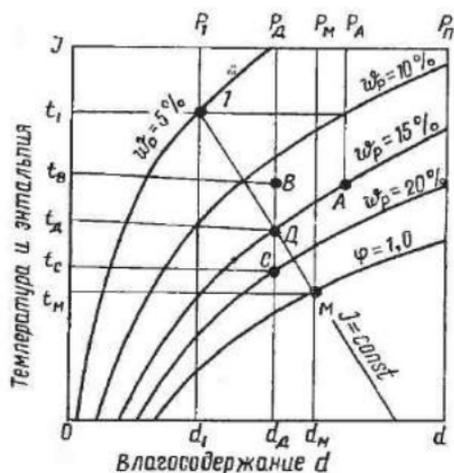


Рис. 58. Нанесение на Idw_p -диаграмму (см. рис. 31) параметров тепло- и влагообмена между воздухом и гигроскопическим материалом

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 $d = \text{const}$, 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_{dw} -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 ω_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_{dw} -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 ограничено 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

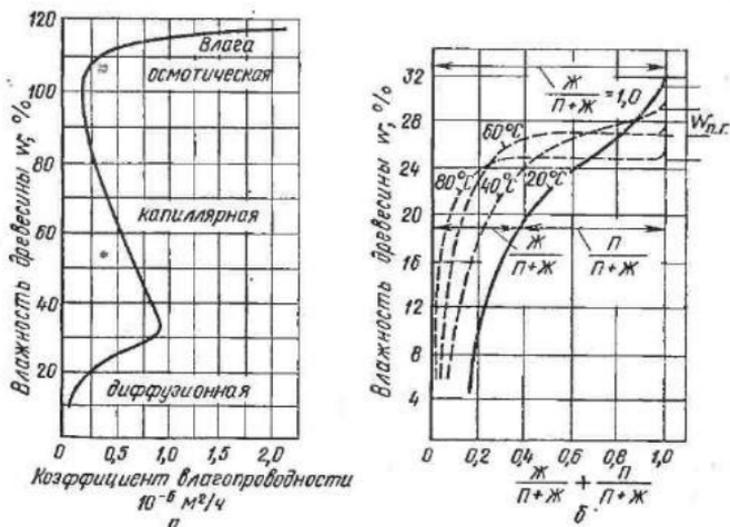


Рис. 59. Кривые влагопроводности древесины бука в радиальном направлении:

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 вяз- кость $\nu \cdot 10^{-4}$, 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 влажнoпроводности; второй член — диффузионную влажнoпроводность; третий — молярную влажнoпроводность (когда температура древесины при атмосферном давлении прибли-

Рис. 60. Кривые зависимости термограднентного коэффициентa δ древесины сосны от ее температуры t

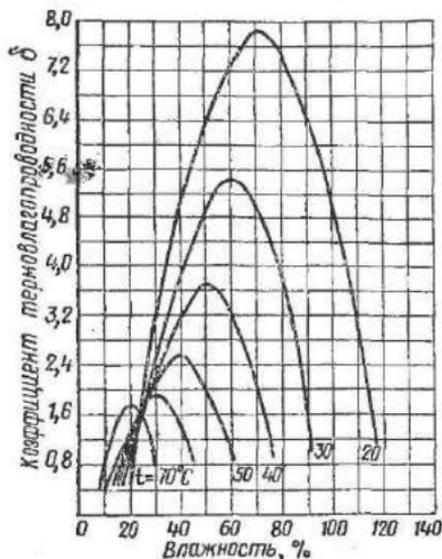
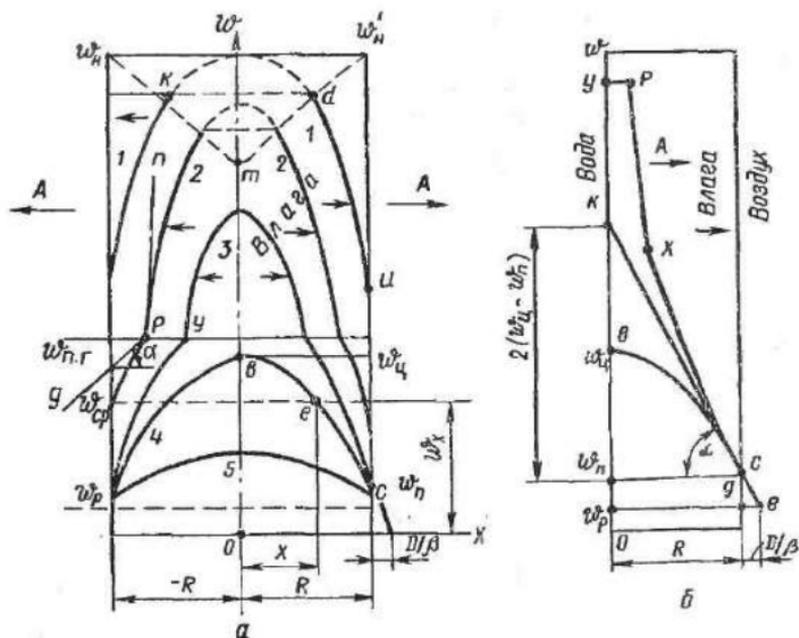


Рис. 61. Распределение влажности по толщине материала во время сушки:

a — кривые влажности в различные периоды (1, 2, 3, 4, 5) сушки материала; *b* — градиент влажности $(k-w_n)/R$ у поверхности материала в точке *c*, а также линия *yPxc* градиента влажности при стационарном потоке влаги



жается к 100°C или превышает эту температуру). Обычно это уравнение рассматривают в виде

$$-\frac{\partial w}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad (158)$$

с учетом лишь диффузионной влажнoпроводности, что относится