

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОУ ВПО КОСТРОМСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# **ФИЗИКА ДРЕВЕСИНЫ**

Учебное пособие

Кострома  
2009

УДК 674.03:620.1

Рецензенты:

С.А. Бородий, профессор КСХА, доктор сельскохозяйственных наук;  
Научно-технический совет филиала ФГУ ВНИИЛМ «Костромская лесная  
опытная станция».

Физика древесины: учебное пособие – Кострома : Изд-во КГТУ,  
2009. – 75 с.

В учебном пособии рассмотрен комплекс вопросов, связанных с физическими свойствами древесины, строением древесины как растительной конструкции, анизотропией древесины; изложены сведения о физических основах сушки и пропитки древесины.

Впервые систематизирован учебный материал по дисциплине «Физика древесины».

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 250301 «Лесоинженерное дело» и 2504032 «Механическая технология древесины».

Составители:

Н.В. Рыжова – кандидат биологических наук, доцент кафедры лесоинженерного дела КГТУ;

В.В. Шутов – доктор биологических наук, профессор кафедры лесоинженерного дела КГТУ.

ISBN

© Костромской государственной технологической университет, 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
<b>Глава 1. Строение древесины</b>	<b>6</b>
1.1. Ствол дерева как растительная конструкция	6
1.2. Формирование элементов древесины	9
1.3. Строение древесины	11
<b>Глава 2. Плотность древесины</b>	<b>15</b>
2.1. Общие сведения о плотности древесины	15
2.2. Влияние различных факторов на плотность древесины	16
2.3. Распределение плотности внутри ствола	18
2.3.1. Изменчивость плотности ствола в поперечном направлении	19
2.3.2. Изменчивость плотности ствола в продольном направлении	19
2.4. Влияние плотности на физико-механические свойства древесины	20
2.4.1. Влияние плотности на физические свойства древесины	20
2.4.2. Влияние плотности на механические свойства древесины	21
<b>Глава 3. Влажность древесины</b>	<b>23</b>
3.1. Классификация влажных тел. Состояние воды в древесине	23
3.2. Гигроскопичность и равновесная влажность древесины	25
3.3. Усушка и разбухание древесины	27
<b>Глава 4. Сушка древесины</b>	<b>30</b>
4.1. Виды и способы сушки древесины	30
4.2. Влажностные деформации пиломатериалов при сушке	31
4.3. Предупреждение влажностных деформаций пиломатериалов и заготовок	34
4.4. Динамика сушки	37
4.5. Брак сушки	40
<b>Глава 5. Физические основы пропитки древесины</b>	<b>42</b>
5.1. Физические явления в процессах пропитки древесины	42
5.2. Движение жидкости в древесине под воздействием капиллярных сил	42
5.3. Движение жидкости в древесине под действием избыточного давления	46
5.4. Диффузия пропитывающих веществ в древесину	48
<b>Глава 6. Резонансные свойства древесины</b>	<b>52</b>
6.1. Основные требования к свойствам резонансной древесины	52
6.1.1. Общее понятие о резонансной древесине	52
6.1.2. Параметры резонансной древесины	52
6.2. Строение резонансной древесины	56
6.2.1. Макростроение древесины	56
6.2.2. Микростроение древесины	57
6.3. Изменчивость резонансных свойств древесины внутри ствола	59
6.4. Диагностика резонансной древесины	61

6.4.1. Косвенные способы диагностики	61
6.4.2. Прямые способы диагностики	64
<b>Глава 7. Анизотропия древесины</b>	<b>67</b>
7.1. Оптимизация опорных конструкций живых систем в процессе эволюции	67
7.2. Анизотропия древесины как следствие ее макро- и микро- строения	71
Заключение	74
Список использованной литературы	75

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых первых материалов, которые стал использовать человек, является древесина. Нет ни одной отрасли промышленности, где не используется древесина или получаемые из нее продукты. Можно смело сказать, что древесина – самый распространенный природный материал в жизни человека.

Однако древесина имеет ряд недостатков: анизотропное строение, повышенная влажность, наличие пороков, способность к гниению, короблению, горению и т.д. Часть их можно устранить. Качественная сушка снижает влажность и не вызывает деформаций древесины. Пропитка защищает древесину от поражения насекомыми, бактериями и грибами, а также снижает способность к горению. Сушка и пропитка позволяют использовать древесину в большем количестве отраслей промышленности.

Некоторые особенности древесного материала необходимо учитывать при переработке, т. к. устранить их невозможно. Нельзя изменить макро- и микростроение древесины, а значит, анизотропия всегда будет присутствовать в древесном материале. Анизотропное строение древесины обуславливает изменчивость физико-механических свойств по радиусу и по высоте ствола; зависимость этих свойств от породы, возраста, условий местопрорастания и т.д. Нельзя вырастить дерево полностью без пороков: например, сучки (важный сортообразующий порок) являются основаниями ветвей, без которых древесное растение не может существовать.

В то же время древесина обладает рядом достоинств, которых нет у искусственных материалов. Изделия из нее экологически безопасны, их поверхность имеет особую текстуру, они обладают природным теплом и эстетической красотой. Нельзя также забывать, что древесина – это возобновляемый материал: на месте спиленного дерева может появиться новое, которое через десятилетия станет источником природного материала.

Знание свойств древесного природного материала важно для более качественной его переработки.

## Глава 1. Строение древесины

### 1.1. Ствол дерева как растительная конструкция

Прочность древесины тесно связана с жизнью дерева. Ствол выполняет множество функций: поддерживает ветви с листьями, проводит органические и минеральные вещества в виде растворов, является хранилищем запасных питательных веществ в зимний период, сопротивляется давлению ветра и температурным воздействиям.

На ствол дерева давит крона и иногда возникает дополнительная нагрузка в виде атмосферных осадков. Кроме того необходимо учитывать и собственный вес ствола, достигающий у крупных деревьев 10 т и более.

Возникающие в стволе дерева напряжения достигают значительной степени, причем они переменны как по величине, так и по знаку. Если учесть, что ствол дерева служит сотню и более лет (а у некоторых пород несколько тысяч лет), то становится понятным, каким рациональным строением должна обладать древесина и какой уникальной природной конструкцией является ствол дерева.

Данные о строении стебля растения, и в частности ствола дерева, стали основой для конструирования инженерных сооружений. Уже давно обращали внимание на то, что строение стебля растения представляет собой своеобразную инженерную конструкцию.

Рассматривая стебель, Галилей в 1638 г. пришел к выводу, что трубчатые балки лучше сопротивляются изгибанию, чем балки сплошные, и наглядно продемонстрировал это явление на примере соломинки. Подробнее развил эту идею Неемия Грю в 1657 г.

Специальные исследования строения ствола растений как инженерной конструкции проведены крупным ботаником Швенденером (1874). Наблюдая за устройством разного рода инженерных конструкций (железных мостов, зданий вокзалов с большим числом балок), он пришел к выводу, что и скелет растения основан на тех же принципах. Согласно учению Швенденера, органы растений, включая и стебель, представляют собою балки, построенные так, чтобы при наименьшей затрате материала достигалась наибольшая жесткость на изгиб.

В конце XIX в. лесоводами было выдвинуто несколько гипотез о строении ствола дерева. По теории П. Д. Козицына ствол дерева представляет собою брус равного сопротивления, который при наименьшей затрате материала оказывает наибольшее противодействие изгибающей силе ветра. При однородном строении круглого бруса диаметры  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , взятые на разном расстоянии от точки приложения изгибающей силы  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ , находятся в следующем соотношении:

$$d_1^3 : d_2^3 : d_3^3 = l_1 : l_2 : l_3. \quad (1.1)$$

П. Д. Козицын считал, что по этому закону построены лишь стволы, не имеющие ядра, а стволы с ядром построены по законам полого бруса равного сопротивления, в котором диаметры, взятые на разном расстоянии от точки приложения силы, находятся между собой в соотношении

$$d_1^{4.5} \cdot d_2^{4.5} : d_3^{4.5} = l_1 \cdot l_2 : l_3 . \quad (1.2)$$

Однако во многих случаях теоретически вычисленные по настоящей гипотезе диаметры полного совпадения с действительными не дают.

В XX в. над растением как инженерной конструкцией работал профессор В. Ф. Раздорский. Он считал органы растений в строительномеханическом отношении балками-пружинами и балками-колоннами-пружинами. По его мнению, растительные конструкции по своему внутреннему строению близки к комплексным сооружениям, представляющим собою железобетонные конструкции.

Раздорский считал, что конструкция растений может быть объяснена с точки зрения учения о приспособлении их к сопротивлению механическим воздействиям лишь при том условии, если принять во внимание противоположные принципы, лежащие в основе растительных сооружений. С одной стороны, органы растений подвергаются статической нагрузке, с другой – растение выдерживает динамические воздействия. Поскольку органы работают в качестве балок и колонн, статической нагрузке отвечает удаление сопротивляющегося материала к периферии и возможно малая длина органов. Приспособлению к работе деформаций при динамической нагрузке отвечает концентрация сопротивляющегося материала к продольной оси и увеличение балки-пружины. С этими двумя противоположными принципами находится в конфликте конструктивное требование, отвечающее комплексному характеру растительных сооружений. Для монолитности их требуется раздробленность стереомного каркаса (совокупность механических тканей) и распределение его по всему рабочему сечению. Конструкция данного органа растения в определенный момент развития отражает борьбу этих принципов, с перевесом того или другого.

Однако следует заметить, что ни одна из гипотез не учитывает неодинаковой прочности древесины по диаметру и высоте ствола, а также напряженности отдельных элементов его, вызванной биологическими процессами при жизни дерева.

Ствол дерева как растительную конструкцию можно рассматривать как консоль, находящуюся под действием силы ветра, и как стержень, работающий на продольный изгиб под действием собственного веса и веса кроны. При несимметричной кроне действием ветра вызывается и кручение ствола. Эти силы характеризуются как объемные (собственный вес), как равномернораспределенные (сила давления ветра на ствол) и, наконец, как распределенные по определенному закону в зоне кроны дерева.

Только в местах прикрепления отдельных ветвей к стволу силы, воспринимаемые каждой ветвью, передаются стволу сосредоточенно.

Ветер является одним из решающих факторов формирования ствола и распределения качества древесины по его высоте.

Прочность древесины ствола изменяется по диаметру и по высоте его. Наибольшая прочность древесины наблюдается в комлевой части; по направлению к кроне прочность уменьшается. Степень уменьшения прочности зависит от сбега; с увеличением сбега разница в прочности древесины между комлевой и вершинной частями ствола увеличивается. Чем больше ветровая нагрузка, тем больше сбег ствола.

Дерево, выросшее в густом насаждении и получившее свободу после того, как окружавшие его деревья были вырублены, даже при незначительном ветре теряет устойчивость и изгибается.

Древесина, как основной материал ствола дерева, все время находится в напряженном состоянии, причем величина и характер напряжений непрерывно изменяются.

Под действием силы ветра, а также собственного веса и веса кроны древесина ствола испытывает напряжения на сжатие, растяжение и скалывание вдоль волокон и, кроме того, при несимметричной кроне – на кручение. Напряжения на сжатие и растяжение вдоль волокон являются решающими. Под воздействием этих напряжений ствол дерева, в результате многовекового приспособления к окружающей среде, принял наиболее рациональную форму с рациональным изменением механических свойств по диаметру и высоте.

В дереве форма ствола и качество древесины тесным образом связаны между собою. В сечениях наибольшей концентрации силовых факторов диаметр ствола и прочность древесины максимальны.

В местах размещения ветвей ствол получает местное утолщение и местное увеличение прочности древесины на скалывание и смятие. Сопротивляемость ствола дерева скалывающим усилиям и кручению достигается главным образом за счет сучковатости и отчасти за счет свилеватости древесины. На устойчивость ствола дерева оказывает большое влияние ажурное строение древесины.

При рассмотрении ствола дерева как растительной конструкции нельзя не учитывать и напряженности элементов древесины в растущем дереве.

В живых элементах ствола дерева, а именно в периферийных годовых слоях, прилегающих к камбию, и в сердцевинных лучах на значительной их протяженности, – клетки находятся в растянутом состоянии, выполняя роль напряженной арматуры. Мертвые элементы в стволе дерева при этом находятся в сжатом состоянии.

Таким образом, большая прочность и устойчивость ствола обеспечиваются рациональной его формой, рациональным распределением древесины разного качества по его высоте и ажурностью внутренней

структуры древесины и, наконец, соответствующим расположением напряженной арматуры в поперечном сечении и по контуру ствола.

## 1.2. Формирование элементов древесины

Древесина состоит из разнообразных элементов, неодинаково скомбинированных в различных древесных породах и по-разному приспособленных к выполнению тех или иных функций жизни дерева.

Древесина хвойных пород отличается от древесины лиственных простотой и однообразием строения. Весной из клеток камбия образуются тонкостенные трахеиды с большими полостями, во второй половине вегетационного периода – толстостенные трахеиды с малыми полостями.

Камбий – однорядный слой клеток, находящихся в стадии дифференциации и лежащий между вполне развитой ксилемой и флоэмой. Камбиальной зоной называют слой камбия вместе с молодыми, еще не дифференцированными элементами древесины. Примыкающие к этой зоне клетки, находящиеся в стадии дифференциации, условно называют прикамбиальной зоной.

Среди удлиненных, очень сильно вытянутых вдоль оси ствола клеток камбия разбросаны группы мелких паренхимных клеток, из которых развиваются сердцевинные лучи. Деление клеток камбия в сторону древесины происходит раз в 10 чаще, чем в сторону луба. У древесных пород оно обычно происходит в тангенциальной плоскости. Ось плоскости деления расположена косо, т. е. под углом к длинной оси клетки. Образование клеточной оболочки идет соответственно наклонному положению веретена деления.

У большинства пород камбиальные клетки имеют разную длину и не образуют правильных горизонтальных рядов. Они достигают определенной длины, затем делятся наклонными перегородками на две половинки, которые в свою очередь разрастаются в длину и вновь делятся. Поэтому длина камбиальных клеток сильно различается.

Радиальные стенки камбиальных клеток отличаются от тангенциальных своим строением и свойствами. Они больше склонны к разбуханию и несколько толще, чем тангенциальные. Тангенциальные стенки являются более устойчивыми соединениями, несмотря на их малую толщину. Срединные слои – наиболее плотная, трудно разделяемая часть оболочки, особенно в тангенциальной стенке.

Первичные оболочки клеточных стенок состоят из целлюлозы, гемицеллюлозы и полиуронидов. По мере созревания клеток в первичных оболочках и в срединном слое откладывается много лигнина. Две первичные оболочки соседних клеток и один срединный слой между ними образуют кажущуюся однородной срединную пластинку. Первичная оболочка мало анизотропна и плохо растворима.

В первой фазе развития трахеиды поздней и ранней частей годового слоя одинаковы. Те и другие тонкостенны, заполнены протоплазмой. Второй фазой развития является расширение клетки, увеличение ее размеров. Первичные оболочки вместе со срединным слоем утончаются, и очертания их изменяются. Ткани древесины оказывают одна на другую значительное давление, поэтому у зрелой клетки очертания иные, чем у молодой.

Клетки, проводящие в дереве питательные вещества, удлиняются в направлении потока. Это наблюдается в сердцевинных лучах, где клетки удлиняются радиально. Толщина вторичной оболочки одних типов клеток сильно отличается от толщины других. В клетках с проводящими и механическими функциями вторичные стенки обыкновенно толще, чем в клетках, преимущественно предназначенных для запасания веществ. Утолщение оболочки клетки происходит последовательным образованием слоев (теория наложения). Слои откладываются снаружи к центру клетки, так что самым старым слоем оказывается наружная часть клеточной стенки – первичная оболочка, а самым молодым – внутренний слой клеточной стенки, непосредственно прилегающий к протоплазме.

В поздней части годового слоя радиальный диаметр трахеид меньше, чем в ранней; клеточная стенка значительно толще. Образование ранних трахеид у сосны Московской области заканчивается, в зависимости от погоды, количества осадков и пр., – в июне–июле, и толщина их оболочек больше не меняется. Затем начинают образовываться поздние трахеиды, отличающиеся от ранних более толстыми стенками и меньшими полостями. Образование трахеид сосны прекращается в первых числах сентября. Толщина клеточных стенок поздних трахеид изменяется неравномерно – две рядом лежащие клетки могут различаться по толщине стенок. Образование трахеид, так же как и утолщение их оболочек, происходит неравномерно. Каждая клетка проходит свои фазы развития – в зависимости от ее положения в данной системе, от водоснабжения и температуры, доступа питательных веществ и от деятельности протоплазмы в разное время вегетационного периода. Камбий, откладывающий древесину, работает с различной интенсивностью в разных частях дерева, деятельность его зависит и от внешних условий.

Конечной стадией развития оболочки является ее одревеснение. Этот процесс протекает от центра к периферии, от ранее отложившихся зрелых клеток к более молодым, приближающимся к камбию. Неодревесневшими являются прилегающие к камбиальному слою два-три ряда молодых трахеид. Иногда в пределах одной клетки одревесневает более старая часть клеточной оболочки, обращенная к центру ствола, а более молодая, обращенная к камбию, остается неодревесневшей.

Одревеснение оболочки незначительно нарушает жизненные функции клеток. В клетках древесины так же накапливаются крахмал,

белки и другие вещества. Одревесневшие клетки могут даже иногда делиться. Рост одревесневших клеток прекращается. Одревесневшие оболочки устойчивее целлюлозных против разрушительного действия различных микроорганизмов и грибов, особенно в ядровой части древесины. Однако одревесневшая оболочка может разрушиться и полностью раствориться при действии ферментов, возникающих в самом растении.

Процесс образования древесины у лиственных пород протекает быстрее, чем у хвойных. Если у хвойных пород на поперечном срезе можно проследить динамику утолщения клеточной оболочки, то у лиственных это сделать трудно. После двух-трех рядов тонкостенных клеток камбиальной зоны располагаются толстостенные клетки либриформа, затем сосуды и другие ткани, характерные для лиственных пород. Переход между тонкостенными камбиальными клетками и толстостенными элементами древесины так резок, что обычно при взятии образца, кора в зоне камбия отрывается от древесины.

Утолщения на стенках сосудов могут быть самого различного характера: кольчатое, спиральное, сетчатое.

С одревеснением связано изменение не только химического состава, но и физико-механических свойств оболочек: увеличивается их прочность, уменьшаются гигроскопичность и набухание.

В процессе образования клеточной оболочки различия между ее частями выявляются более резко. В окончательно сформировавшейся оболочке эти различия обнаружить труднее.

### 1.3. Строение древесины

Древесина состоит из проводящих, механических и запасующих тканей.

**Проводящими тканями** в древесине являются трахеальные элементы – сосуды и трахеиды. По строению они приспособлены для проведения растворов.

Сосуды представляют собой трубки длиной около 2 см, а в отдельных случаях до 10 см и более. Диаметр сосудов 0,02–0,50 мм. Очень широкие сосуды у дуба – диаметром 0,40 мм, тогда как у бересклета всего 0,05 мм. Сосуды образуются из ряда члеников путем растворения их перегородок. Эти участки называются перфорационной пластинкой.

У наиболее широких сосудов перфорационные пластинки расположены горизонтально, у более узких – наклонно и часто не находятся на концах члеников сосудов, а сильно сдвинуты на вертикальные стенки. Перфорации бывают простые – если образуется одно округлое или овальное отверстие с остающейся лишь по краю каймой, и лестничные – со многими удлиненными параллельными отверстиями и остающимися между ними перегородками. Реже встречаются сетчатые перфорации.

Тот или иной тип перфорации является постоянным, характерным признаком родов и семейств и служит для распознавания пород. Не исключена возможность, что тип перфорации оказывает влияние на водопроницаемость древесины, ее пропитку различными растворами. На механические свойства древесины тип перфорации не оказывает влияния.

Перфорации отличаются большой стойкостью. Так, после 1000 лет пребывания древесины в земле в самых различных условиях, встречаются хорошо сохранившиеся лестничные перфорации даже тогда, когда стенки сосудов разрушились.

Лиственные породы можно разделить на две группы: кольцесосудистые и рассеянно-сосудистые. У кольцесосудистых пород в ранней части годичного слоя имеется кольцо крупнопросветных сосудов, диаметр которых значительно больше, чем диаметр сосудов поздней части. Примерами кольцесосудистой древесины могут служить ясень и дуб. Рассеянно-сосудистыми называются породы, у которых сосуды имеют почти одинаковый размер как в ранней, так и в поздней древесине и равномерно распределены по годичному слою. Типичными примерами рассеянно-сосудистых пород могут служить береза и осина.

Расположение сосудов, их группировка в том или ином направлении может оказывать влияние на физико-механические свойства древесины. Между типичными кольце- и рассеянно-сосудистыми группами существуют переходные формы с самым разнообразным распределением сосудов в ранней и поздней древесине.

Трахеиды – это прозенхимные клетки, не имеющие отверстий в месте соединения друг с другом. У трахеид, как и у сосудов, имеются окаймленные поры и иногда спиральные утолщения. Концы трахеид заострены. Трахеиды у лиственных пород бывают двух родов: сосудистые со слабо утолщенными стенками при сравнительно широкой полости с многочисленными, довольно крупными окаймленными порами и волокнистые, приближающиеся по форме к либриформу. Волокнистые трахеиды толстостенны, с узкой полостью; стенки их имеют немногочисленные мелкие поры со щелевидными каналами и узким окаймлением.

У хвойных пород трахеиды выполняют не только свойственные им проводящие функции, но и **механические**. Трахеиды ранней части годичного слоя, обладающие тонкими стенками и большими полостями, служат проводящей тканью; трахеиды же поздней части, имеющие толстые стенки и малые полости, выполняют механические функции. Между поздней древесиной одного года и ранней древесиной следующего года резко выражена линия раздела, поэтому годичные слои ясно различимы. Резкость перехода между ранней и поздней древесиной в пределах одного годичного слоя неодинакова у разных представителей хвойных. Так, у ели и пихты переход постепенный, у лиственницы – резкий, у сосны – менее резкий, чем у лиственницы, и более резкий, чем у

ели. Но даже при таком резком переходе от ранней древесины к поздней, как у лиственницы, заметны промежуточные ряды клеток, которые нельзя отнести по их форме ни к ранней, ни к поздней древесине.

В химическом составе ранней и поздней древесины имеются различия. В ранней древесине больше лигнина и меньше целлюлозы, чем в поздней. Целлюлоза поздней древесины отличается от целлюлозы ранней. Смоляные ходы расположены, в основном, в поздней части слоя, содержание же смолистых веществ значительно больше в ранней древесине.

Ранняя древесина в основном образуется за счет запасных веществ прошлого года; образование же поздней древесины происходит в конце вегетационного периода за счет веществ, отложившихся в текущем году. Деятельность протоплазмы в разное время вегетационного периода различна.

Различие в строении, а также в химическом составе трахеид ранней и поздней частей годичного слоя хвойных пород сказывается и на показателях физико-механических свойств. Так, у сосны предел прочности поздней древесины при растяжении вдоль волокон в 2,7 раза больше, чем ранней (1925 против 706 кг/см<sup>2</sup>). Усушка поздней древесины значительно превышает усушку ранней, особенно у древесины лиственницы.

У лиственных пород прочность древесине придает **механическая ткань** – либриформ, или древесные волокна, длиной 0,3–1,5 мм. Ранняя и поздняя части годичного слоя иногда различаются несущественно. Различия меньше у рассеянно-сосудистых пород, у которых нет большой разницы в строении ранней и поздней частей годичного слоя, и очень заметны у кольцесосудистых пород.

Древесина дуба усыхает сильно, но более равномерно, чем древесина лиственницы.

К **запасающим тканям** древесины относится паренхима, клетки которой входят в состав сердцевинных лучей и тяжелой паренхимы. У хвойных древесная паренхима встречается в небольшом количестве. У лиственных тяжелая паренхима различно распределяется по годичному кольцу и в зависимости от характера распределения выделяют четыре типа паренхимы:

- 1) диффузная – одиночные клетки или группы клеток между другими элементами древесины;
- 2) терминальная – полоски у границы годичного слоя;
- 3) метатрахеальная – тангенциальные слои, не связанные с сосудами;
- 4) паратрахеальная – скопление, связанное с сосудами и трахеидами.

Процентное содержание паренхимы и ее распределение может оказывать влияние на физико-механические свойства древесины.

Сердцевинных лучей в древесине много, тыс. ед./ см<sup>2</sup>: у сосны 2,8–3,2; у кедра и пихты 3,0–5,2; у туи 5,0–6,1; у можжевельника 7,4–10,0. Клетки сердцевинных лучей соединяются одна с другой неплотно. Вдоль луча расположены межклетники, через которые в древесину проникает воздух. Сердцевинные лучи в мертвой древесине оказывают большое влияние на проницаемость, пропитку ее различными жидкостями.

По химическому составу клеточные оболочки сердцевинных лучей отличаются от оболочек других элементов древесины. В сердцевинных лучах дуба содержится больше лигнина и меньше целлюлозы, чем в древесине. Свойства сердцевинных лучей хвойных пород, особенно со смоляными ходами, несколько отличаются от свойств сердцевинных лучей лиственных пород. Присутствие смолы обуславливает повышение твердости и приобретение других, характерных для смолы свойств (например, малая водо- и газопроницаемость).

При механических воздействиях различие между сердцевинными лучами и другими элементами древесины сказывается еще больше, т. к. расположение, строение и химический состав различен. Волокна около лучей часто бывают изогнуты под различными углами в зависимости от ширины лучей.

**Контрольные вопросы:** 1. Какие нагрузки действуют на ствол дерева? 2. С какими конструкциями сравнивали ствол дерева различные ученые? 3. Как меняется прочность древесины по радиусу и высоте? В чем причины таких изменений? 4. Какие существуют особенности строения древесины хвойных и лиственных пород? 5. Как происходит формирование древесных элементов? 6. Каково строение клеток проводящей ткани у хвойных и лиственных пород? В чем особенности строения древесины лиственных кольцесосудитых и рассеяно-сосудистых пород? 7. Каково строение клеток механических и запасющих тканей?

## Глава 2. Плотность древесины

### 2.1. Общие сведения о плотности

Понятие «плотность древесины» стали использовать для характеристики свойств древесных материалов уже на заре самой науки о древесине. В XVIII в. Бюффон и Дюхаме дю Монсо – ученые, положившие начало систематическим исследованиям древесины, – предложили способы определения плотности древесины и приступили к изучению на отдельных древесных породах.

Интерес к проблемам исследования плотности древесины объясняется стремлением разработать универсальные критерии качества древесины. Понятие «качество древесины» тесно связано с промышленным использованием древесных материалов. В связи с чем трудно найти такой показатель, который один давал бы достаточно полную и прямую характеристику качества древесины. Т. к. нельзя найти прямой показатель качества, необходимо искать косвенный способ его выражения: пороки древесины, ширина годичных слоев, процентное содержание поздней древесины, плотность древесины.

Пороки древесины не могут быть универсальным показателем качества древесины из-за нерегулярности своего возникновения, а также из-за того что они не характеризуют качество бездефектной древесины.

Ширина годичного кольца проста в определении невооруженным глазом, значение ее колеблется в широком диапазоне. Однако сама по себе она не может быть достаточным показателем качества древесины даже хвойных пород. Для рассеянно-сосудистых древесных пород значимость этого показателя еще меньше.

Процентное содержание поздней древесины является более надежным, чем ширина годичного слоя, показателем как весовых, так и прочностных свойств древесины, поэтому используется для отбора специальных сортиментов, а также для сортировки пиломатериалов по прочности в ряде зарубежных стран. Например, в Финляндии пиломатериалы сосны и ели 1-го класса прочности должны иметь не менее 24% поздней древесины, а 2-го класса – не менее 17%. В Австралии для получения целлюлозы высокого сорта содержание поздней древесины в сырье должно быть в пределах 15–50%.

Содержание поздней древесины не только влияет на прочность пиломатериалов, количественный и качественный выход целлюлозы, но также определяет вес древесного сырья, его внешний вид и обрабатываемость. Однако процентный критерий неприменим к листовым породам.

Плотность древесины как показатель качества древесины имеет преимущества перед всеми другими показателями:

1. Плотность дает весовую характеристику древесины, которая сама по себе уже является фактором качества древесных материалов. На основе плотности можно рассчитать содержание сухого вещества в древесине и определить весовую продуктивность древостоев; оценить эффективность лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение производительности насаждений.

2. Плотность древесины влияет на многие физические свойства, а также дает представление о механических свойствах древесины. Так, плотность финских и шведских конструкционных пиломатериалов 1-го класса для сосны должна быть при влажности 15% не менее 500 и ели – 470 кг/м<sup>3</sup>, а для 2-го класса соответственно – 450 и 420 кг/м<sup>3</sup>. Показатель плотности можно использовать при отборе высокосортных свай, столбов линий электропередач и других изделий, где основным фактором является высокая прочность.

3. Плотность древесины влияет на качество многих продуктов, получаемых из нее, – бумаги непример. В целлюлозном производстве плотностью определяется важнейший экономический показатель – выход целлюлозы. Главным образом от плотности древесины зависит качество сырья, используемого в производстве ДСтП.

4. Плотность определяет топливные свойства древесного сырья (объемную теплотворную способность древесины).

Плотность является важнейшей качественной характеристикой древесного сырья, которую необходимо учитывать как в процессе использования древесины, так и при лесовыращивании.

## **2.2. Влияние различных факторов на плотность древесины**

Колебание значений плотности древесины является результатом очень сложных зависимостей между условиями роста, оказывающими непосредственное влияние на формирование древесины: на образование и дифференциацию клеток, на их структуру и химический состав, на процентное соотношение отдельных тканей, и в частности, соотношение ранней и поздней древесины хвойных, на ширину годичного слоя.

Анатомическое строение и соотношение ранней и поздней древесины. Малые диаметр и длина волокон, тонкие стенки, низкое содержание поздней древесины, как правило, связаны с малой плотностью древесины. Напротив, большие диаметр и длина волокон, толстые стенки, большое содержание поздней древесины дают древесину высокой плотности. Однако данная связь не является очень прочной и в природе встречается целый ряд возможных комбинаций, отличающихся от приведенной. Например, можно найти образцы древесины с малым диаметром волокон, тонкими стенками, высоким содержанием поздней древесины и средней плотностью.

У хвойных, как правило, обнаруживается сильная взаимосвязь между содержанием поздней древесины и ее плотностью. У кольцесосудистых пород – дуба и ясеня установлена тесная корреляция между процентом сосудов и механической ткани – и плотностью.

Ширина годичного слоя. Плотность хвойных пород с увеличением ширины годичного слоя падает, а с уменьшением, напротив, возрастает. У лиственных кольцесосудистых наблюдается противоположная картина. У рассеянно-сосудистых не установлено четкой связи между данными показателями.

Возраст. В процессе роста дерева возраст, в котором образуется древесина, влияет на ее плотность весьма своеобразно. Древесина располагающаяся у сердцевины, составляющая центральный цилиндр ствола, очень часто бывает широкослойной и без резкого контраста между ранней и поздней частями. У этой «молодой» древесины, как правило, невысокая плотность.

У хвойных в более старшем возрастном периоде совершенно независимо от изменений ширины годичного слоя образуется более тяжелая, а у лиственных пород – более легкая древесина. Таким образом, связь между шириной годичного слоя и плотностью древесины с возрастом изменяется.

В целом можно сказать, что плотность древесины хвойных и кольцесосудистых около сердцевины преимущественно определяется образованием так называемой ювенильной (молодой) древесины (исключение составляет молодая древесина угнетенных деревьев в виде очень узких годичных слоев). В древесине, возникающей в более позднее время, четко проявляется связь между шириной годичного слоя и плотностью. Однако эта связь находится под «возрастающим влиянием возраста».

Ядрообразовательный процесс. Притоком веществ, которые в процессе ядрообразования превращаются в составляющие ядровой древесины, производится дальнейшее увеличение плотности, независимое от ранее рассмотренных факторов. Поэтому ядро и заболонь отличаются по своей плотности – и тем сильнее, чем больше они отличаются по своему химическому составу. В связи с этим у заболонной и спелой древесины ели и пихты не имеется различий в плотности, точно так же, как у спелодревесных пород бука и осины. Однако у таких ядровых пород, как сосна, лиственница и дуб, плотность древесины заболони ниже плотности древесины ядра того же возраста.

Экстрактивные вещества своим содержанием увеличивают плотность древесины.

Влажность оказывает наиболее сильное влияние на плотность древесины. С увеличением влажности: плотность увеличивается – у пород, плотность которых менее  $1,1 \text{ г/см}^3$ ; у более плотных пород плот-

ность сначала уменьшается и только после перехода через предел гигроскопичности снова возрастает.

Плотность древесины сучков и корней. Плотность сучковой древесины как хвойных, так и лиственных пород больше плотности окружающей древесины ствола. Причиной этого являются различия в ширине годичных слоев и в анатомическом строении, повышенное (в отдельных случаях до 35–40%) содержание смолистых и ядровых веществ, а также образование реактивной – кренивой и тяговой – древесины. Повышенная плотность распространяется на некоторый объем окружающей стволовой древесины.

Плотность ветвей у хвойных пород наиболее велика в нижней их части; у лиственных пород наблюдается обратная картина. Плотность снижается в направлении к вершине ветви. Плотность ветвей всегда меньше плотности соответствующей им сучковой древесины. Средняя плотность древесины ветвей выше, чем плотность стволовой древесины. Чем больше диаметр ветви, тем больше плотность.

Плотность древесины корней, как правило, меньше плотности ствола. Она уменьшается с удалением от шейки корня. Плотность тонких корней, находящихся на расстоянии 4–5 м от ствола, в 1,5–2 раза меньше плотности корней в околоствольной части.

Плотность кренивой и тяговой древесины. Кренивая древесина тяжелее, чем нормальная древесина того же ствола. В зависимости от интенсивности развития крени ее плотность превосходит плотность нормальной древесины на 13–40%. Повышенная плотность кренивой древесины объясняется большим процентным содержанием поздней древесины и тем, что клетки ранней древесины имеют более толстые стенки по сравнению с нормальной древесиной.

Различия в плотности тяговой и нормальной древесины значительно меньше. Плотность тяговой древесины может превосходить плотность нормальной древесины на 3–12%.

### **2.3. Распределение плотности древесины внутри ствола**

Данные о распределении плотности в стволе дерева необходимы для практики, т. к. с их помощью можно, например, рассчитать содержание сухого вещества древесины в различных частях ствола дерева, получить предварительное представление о механических свойствах древесины. Различия плотности древесины внутри ствола является важным фактором его качества. Резкие различия плотности древесины ствола в поперечном или продольном направлении являются нежелательными для многих сортиментов. Напротив, большая равномерность плотности древесины ствола должна оцениваться как несомненное его достоинство.

### **2.3.1. Изменчивость плотности ствола в поперечном направлении**

Увеличение плотности от сердцевины к камбию характерно для большинства хвойных. Оно было установлено как для обыкновенной сосны, так и для сосен других видов. Плотность сформированной древесины напрямую зависит от процентного содержания летней древесины и от возраста дерева. Средняя плотность ствола сосны достигает максимума, когда возраст дерева становится больше 80 лет.

Плотность древесины ели в направлении от сердцевины к камбию изменяется менее регулярно. Довольно часто она относительно велика в непосредственной близости к сердцевине, как правило, больше, чем у сосны. Плотность ели (в отличие от сосны) сначала уменьшается, но через несколько слоев начинает снова увеличиваться. Плотность древесины ели имеет свой минимум в 5-м годичном слое от сердцевины. В древесине ситхинской ели минимум в 10–15-м слое, считая от сердцевины.

Плотность березы регулярно увеличивается, но при этом изменение плотности менее значительно, чем у сосны.

Плотность осины, как правило, изменяется довольно плавно. В комлевой части наблюдается некоторое возрастание плотности. Средняя (по высоте) часть ствола осины отличается максимальной выравненностью плотности в поперечном направлении. В зоне кроны плотность древесины ствола увеличивается в направлении от коры к сердцевине.

### **2.3.2. Изменчивость плотности ствола в продольном направлении**

Изменения плотности в продольном направлении зависят от длины ствола. Наибольшие по абсолютному значению различия наблюдаются в длинных стволах, однако короткие стволы обнаруживают наиболее резкие (в расчете на единицу длины) изменения плотности.

У хвойных уменьшение плотности особенно хорошо выражено между комлем и срединной частью дерева. При дальнейшем движении к вершине картина изменения плотности у разных пород может сильно различаться. Одни породы, например ель, обнаруживают лишь небольшие различия в плотности; другие – напротив, довольно значительные.

У лиственных пород различия изменения плотности вдоль ствола выражены сильнее, чем у хвойных. У различных кольцесосудистых пород, например у дуба, плотность изменяется вдоль ствола незначительно, в то время как у одних рассеянно-сосудистых пород плотность сначала резко падает, затем к вершине снова возрастает, а у других пород этого класса монотонно уменьшается или увеличивается по направлению к вершине.

Из анализа особенностей распределения плотности древесины в продольном направлении ствола сосны, ели, березы и осины можно сделать выводы:

1. Сосна и береза характеризуются довольно резким уменьшением плотности в направлении от комля к вершине, т. е. отличаются значительно большими, чем ель и осина, изменениями плотности по высоте ствола.

2. У ели и осины плотность в верхней части ствола не меньше, а иногда и больше, чем середине и в комле.

Объяснение закономерностей распределения плотности у четырех названных пород следует искать прежде всего в особенностях строения их кроны и характера очищения ствола от сучьев. Сосна и береза относятся к породам, у которых процесс очищения от сучьев происходит быстро, тогда как ель и осина характеризуются замедленным протеканием этого процесса. В результате таких различий сосна и береза образуют стволы с высоко поднятой кроной; напротив, у ели и осины живая крона опускается значительно ниже. Обычно в пределах кроны невелико содержание поздней древесины. Напротив, годовичные слои, формирующиеся на значительном удалении от живой кроны, имеют довольно большое содержание поздней древесины и, как следствие, большую плотность.

Другим немаловажным фактором является действие ветра. Ветровая нагрузка значительно больше на те деревья, у которых кроны развиты в большей степени. Для создания необходимой прочности у таких деревьев должна формироваться древесина с повышенной плотностью, что и наблюдается у ели и осины в верхней части ствола.

Крона дерева, оказывающая большое влияние на плотность древесины ствола, сама находится под воздействием ряда факторов. Развитие кроны зависит от положения дерева в насаждении, условий местопроизрастания (включая географический фактор), наследственной предрасположенности.

Все названные факторы, таким образом, могут оказывать косвенное влияние на плотность древесины и, в частности, на ее распределение в продольном направлении ствола.

## **2.4. Влияние плотности на физико-механические свойства древесины**

### **2.4.1. Влияние плотности на физические свойства древесины**

Влажностные свойства (предел гигроскопичности и разбухание). С увеличением плотности предел гигроскопичности сильно понижается, и для  $\rho_0=1,51 \text{ г/см}^3$  (плотность практически равная плотности древесинно-

го вещества)  $W_{п.г.}=16\%$ . Предел гигроскопичности одной из самых легких пород – бальзы составляет 54%.

С увеличением плотности древесины увеличивается ее разбухание.

Максимальная влажность, непосредственно зависящая от объема полостей клеточной структуры, определяется плотностью.

Водопроницаемость зависит от плотности: с увеличением плотности водопроницаемость снижается.

Тепловые свойства. *Теплоемкость* древесины, которая рассчитывается на единицу ее массы, не зависит от плотности. Это соответствует известному положению теплофизики, о том что теплоемкость составных веществ не зависит от степени уплотнения отдельных компонентов. Следует также учесть, что удельные теплоемкости целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз, из которых состоит древесина, различаются очень незначительно.

Плотность оказывает значительное влияние на *теплопроводность*, т. к. при изменении плотности – это изменение весового соотношения между отдельными компонентами (древесинное вещество, вода и воздух), образующими древесину. С увеличением плотности теплопроводность увеличивается.

Легкая древесина нагревается быстрее тяжелой. Это свидетельствует о зависимости *температуропроводности* древесины от ее плотности.

Электрические свойства. Плотность оказывает некоторое влияние на электропроводность, однако оно полностью перекрывается трудно исключаемым влиянием влажности. Поэтому связь плотности с электропроводностью, по-видимому, не имеет практического значения. То же самое справедливо и в отношении ряда других электрических свойств древесины.

Звуковые свойства в значительной степени определяются плотностью. Это особенно относится к звукопроводности и резонансной способности древесины.

Таким образом, можно сделать вывод, что значительная часть физических свойств древесины зависит от плотности.

#### **2.4.2. Влияние плотности на механические свойства древесины**

Существует различная степень связи показателей прочностных и деформативных свойств древесины с ее плотностью. Наиболее тесной является связь с пределом прочности при сжатии вдоль волокон и при статическом изгибе. Связь плотности с прочностью на сдвиг и с модулем упругости относительно тесная, а с прочностью на растяжение и ударный изгиб – весьма слабая.

Связь между механическими свойствами древесины и ее плотностью очевидна, однако практически не очень значима из-за влияния влажности, того или иного направления силы и особенно из-за наличия пороков.

**Контрольные вопросы:** 1. Какие показатели рассматривались как возможные критерии качества древесины? Почему предложенные показатели не могут использоваться для определения сортности древесины? 2. Каковы преимущества плотности древесины перед другими показателями качества? 3. Как изменяется плотность древесины по высоте ствола (в поперечном направлении)? 4. Как изменяется плотность древесины по радиусу ствола (в продольном направлении)? 5. Как плотность влияет на влажностные и звуковые свойства древесины? 6. Как плотность влияет на электрические и тепловые свойства древесины? 7. Как плотность влияет на механические свойства древесины?

## Глава 3. Влажность древесины

### 3.1. Классификация влажных тел. Состояние воды в древесине

По характеру взаимосвязи с водой влажные материалы (тела) делятся на три основных вида: коллоидные, капиллярно-пористые и капиллярно-пористые коллоидные.

Коллоидные тела (эластичные гели) при изменении содержания воды заметно меняют свои размеры, но сохраняют свойство эластичности. Типичным их представителем является желатин. По характеру набухания в жидкой среде они бывают неограниченно набухающие, т. е. способные переходить в коллоидный раствор, и ограниченно набухающие.

Капиллярно-пористые тела (хрупкие гели) при изменении содержания воды мало изменяют свои размеры, но становятся при высыхании хрупкими (керамические материалы, древесный уголь и др).

Капиллярно-пористые коллоидные тела имеют капиллярно-пористое строение, а стенки их капилляров обладают свойствами эластичных ограниченно набухающих гелей (кожа, ткани, торф, древесина).

Содержание воды в древесине характеризуется отношением массы воды к массе самой древесины. Это отношение, выраженное в процентах, называют **влажностью**. Влажность может определяться либо по отношению к массе абсолютно сухой древесины, либо по отношению к общей массе влажной древесины. В древесиноведении и технологии деревообработки принято исчислять абсолютную влажность  $W_{абс}$ , % по первому способу:

$$W_{абс} = \frac{m_e}{m_0} 100 = \frac{m - m_0}{m_e} 100, \quad (3.1)$$

где  $m_e$  – масса воды в образце, г;

$m_0$  – масса образца абсолютно сухой древесины, г;

$m$  – общая масса образца влажной древесины, г.

Иногда для расчетов удобнее вычислять содержание воды не в процентах, а безразмерным отношением, которое называют **влажностью**  $u$  древесины:

$$u = \frac{m_e}{m_0} = \frac{W}{100}. \quad (3.2)$$

Древесина, как известно, состоит из разнообразных растительных клеток, преимущественно удлиненной формы – волокон. Основными типами клеток являются трахеиды (у хвойных пород), волокна либриформа и сосуды (у лиственных). Кроме того, в древесине содержатся клетки сердцевинных лучей и в небольшом количестве клетки древесной паренхимы.

Полости клеток, имеющие сравнительно крупные поперечные размеры (10–100 мкм; т. е.  $10\text{--}100 \cdot 10^{-6}$  м), соединены между собой порами и образуют в древесине капиллярную систему, обладающую сравнительно хорошей проницаемостью для жидкостей и газов в направлении вдоль волокон и значительно меньшей – поперек волокон.

Клеточные стенки имеют слоистую структуру из микрофибрилл, переплетенных под разными углами наклона. В слоях выделяются более крупные структурные образования – макрофибриллы, имеющие поперечные размеры 300–500 нм. Между макрофибриллами и внутри них имеются в небольшом количестве пространства, заполненные водой (а в сухой древесине частично воздухом). Они вместе с межмикрофибрилльными прослойками воды формируют в клеточных стенках свою капиллярную систему, более тонкую, чем система клеточных полостей.

Капилляры принято делить по их размерам на макрокапилляры с условным радиусом  $r > 100$  нм ( $10^{-5}$  см) и микрокапилляры с  $r < 100$  нм. Из двух капиллярных систем в древесине система полостей клеток является макрокапиллярной, а система сообщающихся пространств в стенках клеток – микрокапиллярной.

Вода в древесине имеет свободную и связанную формы.

**Свободная**, или макрокапиллярная, вода находится в полостях клеток и удерживается в них механически. Силы капиллярного взаимодействия между этой водой и древесинным веществом очень малы.

**Связанная**, или гигроскопическая, вода содержится в стенках клеток. Она в свою очередь разделяется на адсорбционную и микрокапиллярную.

Адсорбционной называют воду, сорбированную поверхностью элементарных фибрилл и микрофибрилл, образующую межмикрофибрилльные прослойки и связанную с веществом древесины физико-химическими силами поверхностного взаимодействия. Микрокапиллярная вода, связанная с древесиной силами капиллярного взаимодействия, находится частично в свободных от древесинного вещества пространствах стенок клеток, а в основном заполняет микронеровности и углубления на поверхности их полостей.

Древесину, содержащую только связанную воду, называют влажной, а древесину, содержащую кроме связанной еще и свободную воду, – сырой. Древесинное вещество является ограниченно набухающим. Поэтому содержание связанной воды, т. е. влажность собственно клеточных стенок, не может превышать некоторого максимума. Этот максимум, достигаемый при длительном контакте древесины с жидкой (свободной) водой, называется **пределом насыщения клеточных стенок**  $W_{п.н.}$ . Величина  $W_{п.н.}$  характеризует равновесную со свободной водой влажность стенок клеток сырой (свежесрубленной или увлажненной в воде) древесины.

Предел насыщения клеточных стенок древесины разных пород

различен. Для мягких пород он несколько выше (за счет большего содержания микрокапиллярной воды), чем для твердых. Однако для отечественных древесных пород, применяемых в промышленности, колебания  $W_{п.н}$  сравнительно невелики. В практических расчетах их можно не учитывать и пользоваться средним, установленным экспериментально значением предела насыщения клеточных стенок  $W_{п.н} = 30\%$ .

Когда общая влажность древесины выше предела насыщения клеточных стенок, в ней, кроме связанной, содержится и свободная вода. Максимальное содержание свободной воды, зависящее от объема полостей клеток и межклеточных пространств, для древесины разных пород от 60–70 до 200–250 % по отношению к массе сухого вещества.

В растущем и свежесрубленном дереве древесина всегда сырая. Влажность ее изменяется в довольно широких пределах в зависимости от породы, времени года, местоположения в стволе (табл.3.1).

Таблица 3.1

Средняя влажность свежесрубленной древесины, %

Порода	Спелая древесина или ядро	Заболонь	Средняя влажность
Сосна, ель	30–40	100–120	60– 00
Лиственница	40–50	100–120	50–70
Береза	–	70–90	70–90
Осина	–	80–100	80–100
Ясень	35–40	35–40	35–40
Дуб	50–80	70–80	60–80
Кедр	35–65	140–200	80–110

### 3.2. Гигроскопичность и равновесная влажность древесины

Древесина – гигроскопический материал, способный изменять свою влажность при изменении состояния окружающего воздуха. Влажность, к которой стремится древесина при выдерживании ее в воздухе определенного состояния, называется **устойчивой влажностью**.

Древесина может достичь устойчивой влажности, либо поглощая водяной пар из воздуха (сорбция) либо выделяя его в воздух (десорбция). Эти процессы не вполне обратимы. В одинаковых условиях устойчивая влажность при сорбции  $W_{в.с}$  меньше, чем при десорбции  $W_{в.д}$ . Разность между ними  $\Delta W = W_{в.д} - W_{в.с}$  принято называть показателем **гистерезиса сорбции**.

Водяной пар из воздуха поглощают только стенки клеток. Конденсации пара в свободную воду практически нет даже в насыщенном воздухе. Однако если стабильно соблюдается условие  $\varphi = 1$  в течение очень длительного времени, незначительная конденсация в полостях возможна, но она немедленно прекращается при  $\varphi \leq 0,995$ .

Максимальная устойчивая влажность, приобретаемая сухой древесиной при ее длительном выдерживании в воздухе, состояние которого близко к насыщенному ( $\varphi \approx 0,995$ ), называется пределом гигроскопичности  $W_{п.г.}$

**Предел гигроскопичности** – это такая влажность древесины, при которой она поглотила путем сорбции максимально возможное количество связанной воды, но не содержит свободной. Это состояние характеризуется при температуре 15–20 °С средней влажностью около 30 %, как и предел насыщения клеточных стенок. Однако в отличие от предела насыщения, который не зависит от температуры,  $W_{п.г.}$  с ростом температуры уменьшается. При 100 °С он составляет, например, 19–20%.

Устойчивая влажность древесины определяется только состоянием воздуха ( $t$  и  $\varphi$ ). При  $\varphi \approx 1$  устойчивая влажность равна пределу гигроскопичности. При  $\varphi \approx 0$  устойчивая влажность сорбции  $W_{y.c.}$  стремится к нулю. Устойчивая же влажность десорбции  $W_{y.д.}$  в этом случае оказывается немного больше нуля, т. к. часть адсорбционной воды находится в очень прочной связи с древесиной и не удаляется из нее испарением даже в абсолютно сухом воздухе. Лишь при температуре выше 100 °С устойчивая влажность десорбции в абсолютно сухом воздухе может считаться без большой погрешности практически равной нулю.

Гистерезис сорбции зависит отчасти от состояния воздуха, но главным образом от размеров исследуемого образца древесины. Для очень мелких древесных частиц (древесная мука, тонкая стружка) гистерезис невелик (0,2–0,3%). При увеличении размеров образцов показатель гистерезиса увеличивается. Для образцов толщиной более 15 мм и длиной более 100 мм он достигает постоянной величины, равной в среднем 2,5 % влажности.

Среднюю (при сорбции и десорбции) устойчивую влажность называют **равновесной влажностью**  $W_p$ . Таким образом,  $W_p$  близка к влажности, которую приобретает измельченная древесина при длительном выдерживании ее в воздухе определенного состояния.

Устойчивая влажность при сорбции или десорбции для конкретных образцов и сортиментов устанавливается по диаграмме равновесной влажности с учетом показателя гистерезиса:

$$W_{y.c.} = W_p - \frac{\Delta W}{2}; \quad (3.3)$$

$$W_{y.д.} = W_p + \frac{\Delta W}{2}. \quad (3.4)$$

Необходимо иметь в виду, что эти выражения справедливы лишь для древесины атмосферной сушки, не подвергавшейся длительному воздействию повышенной (более 50–60 °С) температуры. Для древесины камерной сушки, имеющей несколько пониженную гигроскопичность, нужно пользоваться приближенными выражениями:

$$W_{y.c.} = W_p - \Delta W; \quad W_{y.д.} = W_p \quad (3.5)$$

или для сортиментов промышленного размера:

$$W_{y.c.} = W_p - 2,5; \quad W_{y.д.} = W_p. \quad (3.6)$$

### 3.3. Усушка и разбухание древесины

Древесина принадлежит к материалам, размеры которых нестабильны и изменяются при изменении температуры и влажности.

Температурные деформации древесины сравнительно невелики. Коэффициенты ее термического расширения – такого же порядка, как и у металлов. Влажностные деформации древесины значительно больше температурных.

Уменьшение линейных размеров или объема древесины, наблюдаемое при снижении ее влажности, принято называть **усушкой**, а увеличение размеров или объема при повышении влажности – **разбуханием**.

Усушка и разбухание древесины объясняются особенностями ее строения и взаимодействия с водой. Поглощение молекул водяного пара поверхностью элементарных фибрилл вызывает утолщение адсорбционных прослоек воды и, следовательно, увеличение размеров (разбухание) клеточных стенок. Обратный процесс – удаления адсорбционной воды вызывает усушку. Разбухание сухой древесины в воздухе или паре прекращается при достижении ею  $W_{п.г.}$ , а в воде –  $W_{п.н.}$

Усушка сырой древесины начинается только от  $W_{п.н.}$ . Изменение содержания свободной воды не вызывает изменения размеров древесины. Исчисление ведется по отношению к размерам или объему образца (сортимента), %: усушки – в сыром состоянии; разбухания – в абсолютно сухом.

Усушка и разбухание – процессы обратимые. При повышении или понижении влажности в заданном диапазоне (до  $\pm 30\%$ ) изменения размеров одного и того же образца одинаковы. Поэтому рассмотрим только усушку. Величина усушки зависит от структурного направления измеряемого линейного размера, от диапазона изменения влажности и от породы древесины. Влияние структурного направления определяется строением древесины. Наибольшая линейная усушка наблюдается в тангенциальном направлении, т.е. в направлении окружности годичных колец (табл. 3.2). Усушка в радиальном направлении, т.е. в направлении радиуса ствола, в 1,5–2 раза меньше. В направлении оси ствола (вдоль волокон) усушка ничтожна и обычно не принимается во внимание.

На анизотропию усушки влияют также сердцевинные лучи (особенно у лиственных пород). В стенках паренхимных клеток сердцевинных лучей микрофибриллы направлены под сравнительно малым углом

к длине. Поэтому продольная усушка сердцевинных лучей по крайней мере в два раза меньше поперечной. Сердцевинные лучи сдерживают усушку древесины в радиальном направлении. С увеличением содержания сердцевинных лучей радиальная усушка древесины уменьшается.

Таблица 3.2

Тангенциальная усушка ранней и поздней зон  
годового слоя древесины, %

Порода	Ранняя зона	Поздняя зона
Лиственница	7,8	9,4
Сосна	6,7	7,5
Ель	6,1	7,4
Дуб	8,4	9,8
Бук	11,4	11,8
Береза	8,6	9,3
Тополь	9,4	10,6
Ива	6,5	6,9

Примечание: Для рассеянно-сосудистых пород под ранней зоной годового слоя подразумевается его первая половина, обращенная к сердцевине, а под поздней – вторая половина, обращенная к коре.

При прочих равных условиях усушка приблизительно пропорциональна изменению (до 30%) влажности древесины. Наибольшую усушку имеют образцы, высыхающие от  $W_{п.н}$  до абсолютно сухого состояния. Такую усушку называют максимальной, или полной.

Под максимальной, или полной, усушкой  $U_{max}$  понимают уменьшение линейных размеров или объема древесины при удалении всего количества связанной воды. Следовательно, для установления  $U_{max}$  влажность древесины должна быть снижена от  $W_{п.н}$  до нуля. Замеренное при этом уменьшение размеров или объема образца относится к размеру или объему образца при  $W_{п.н}$ .

Формула для вычисления полной усушки, %:

$$U_{max} = \frac{a_{max} - a_{min}}{a_{max}} 100\%, \quad (3.7)$$

где  $a_{max}$  – размер или объем образца при влажности равной или выше  $W_{п.н}$ , мм или мм<sup>3</sup>;

$a_{min}$  – размер или объем образца в абсолютно сухом состоянии, мм или мм<sup>3</sup>.

Для определения частичной усушки, при высыхании древесины до нормализованной влажности (12%), используют формулу

$$U_{max} = \frac{a_{max} - a_{12}}{a_{max}} 100\%. \quad (3.8)$$

Усушка при снижении влажности образца до заданной влажности

$$Y_W = \frac{Y_{\max}}{W_{п.н.}} (W_{п.н.} - W) = k_y (30 - W), \quad (3.9)$$

где  $k_y$  – коэффициент, характеризующий величину усушки при изменении влажности клеточных стенок на 1%,  $k_y = Y_{\max}/30$ .

Коэффициенты усушки зависят от породы древесины, а в пределах одной породы – от базисной плотности.

Базисная плотность древесины  $\rho_b$  характеризует массу сухого древесинного вещества в единице объема сырой (т. е. при  $W \geq W_{п.н.}$ ) древесины.

Для большинства древесных пород полную объемную усушку можно приближенно определять

$$Y_{V.\max} = 0,028 \rho_b, \quad (3.10)$$

а полную линейную усушку в тангенциальном и радиальном направлениях соответственно по формулам:

$$Y_{tg.\max} = 0,018 \rho_b; \quad (3.11)$$

$$Y_{r.\max} = 0,01 \rho_b. \quad (3.12)$$

Зная породу древесины, ее базисную плотность и влажность, легко рассчитать величину ожидаемой усушки. Для отдельных пород эти выражения дают некоторую погрешность. Поэтому для точных расчетов усушки следует пользоваться экспериментально установленными коэффициентами, приводимыми в руководствах по древесиноведению.

Рассмотренные закономерности усушки справедливы, строго говоря, лишь при равномерном изменении влажности образца. При промышленной сушке древесины, когда влажность по ее объему распределена неравномерно и процесс усложнен дополнительными явлениями (в частности, внутренними напряжениями), изменение размеров сортимен-та может начаться при средней его влажности выше 30%, а величина этого изменения может отличаться от величины, обусловленной чистой усушкой. Такое изменение размеров, в отличие от чистой усушки, определяется термином **усадка**.

**Контрольные вопросы:** 1. Приведите классификацию влажных тел. 2. Что такое влажность и влагосодержание? Приведите формулы для их определения. 3. В каких состояниях находится влага в древесине? 4. Что такое предел насыщения клеточных стенок? От чего зависит его значение? 5. Дайте определения следующим терминам: устойчивая влажность, гистерезис сорбции, равновесная влажность, предел гигроскопичности. 6. Объясните формулы определения гистерезиса сорбции и устойчивой влажности. 7. Дайте определения следующим терминам: усушка, разбухание, полная и частичная усушка, усадка. 8. Объясните формулы определения усушки. От чего зависит величина усушки?

## Глава 4. Сушка древесины

### 4.1. Виды и способы сушки древесины

Сушка древесины – очень сложный процесс, состоящий из одновременно протекающих физических явлений:

1. теплообмен – поглощение тепла поверхностью материала;
2. теплопроводность – перемещение тепла по материалу;
3. влагоперенос – перемещение влаги по материалу;
4. влагообмен – испарение влаги с поверхности материала.

Классификация видов и способов сушки древесины основывается на особенностях передачи тепла высушиваемому материалу (табл. 4).

Таблица 4

Классификация видов и способов сушки

Вид сушки	Сушильные агенты	Способ сушки	Основные особенности способа сушки
Конвективно-атмосферная	Воздух	На корню	Использование сосущей силы кроны живого дерева
		Атмосферная	На открытых складах или под навесами
Конвективно-тепловая	Воздух, топочный газ, водяной пар и их смеси	Газопаровая	В нагретой газовой среде при атмосферном давлении
		Ротационная	Газопаровая в дополнении с центробежным эффектом
		Вакуумная	Газопаровая при давлении среды ниже атмосферного
	Жидкости	В жидкостях	Использование нагретых жидких сушильных агентов
Кондуктивная	Воздух	Кондуктивная	Передача тепла материалу – посредством теплопроводности при контакте с нагретыми поверхностями
Радиационная	То же	Радиационная	То же излучением
Электрическая	То же	Диэлектрическая	То же в электромагнитном поле ТВЧ, за счет диэлектрических потерь
		Индукционная	То же в электромагнитном поле промышленной частоты от размещаемых внутри штабеля ферромагнитных прокладок, нагреваемых индуктивными токами

Существуют также комбинированные способы сушки, в которых одновременно используются различные агенты, видовые и пр. особенности.

В деревообрабатывающей промышленности подвергается сушке главным образом древесина в виде пиломатериалов (доски, заготовки), а в некоторых отраслях деревообработки (производство фанеры и плит) – в виде лущеного или строганого шпона и мелких частиц (стружка, щепа и т. п.).

Атмосферная сушка, известная еще с древности, не потеряла значения до настоящего времени. Для всех древесных материалов преимущественно используется газопаровая сушка. Для пиломатериалов, высушиваемых в сушильных камерах, этот способ получил в промышленности наименование камерной сушки.

Сушка на корню – кольцевым подрубом деревьев, или выдержкой сваленных хлыстов с живой кроной на лесосеке, позволяет снизить влажность на 15–20%; иногда применяется как операция подготовки к сплаву древесины некоторых пород, имеющих большую плотность.

Радиационная сушка для обезвоживания древесины не применяется. Она иногда используется в технологии отделки для обработки лакокрасочных покрытий.

Этот перечень способов сушки – отражение современного уровня технологии деревообработки, и с течением времени в нем происходят изменения.

## 4.2. Влажностные деформации пиломатериалов при сушке

**Закономерности усушки досок.** Одним из главных требований к технологии сушки пиломатериалов является получение их прямоугольной (ортогональной) в сухом состоянии формы.

Желательно заранее учитывать ожидаемую усушку древесины и в цех деревообработки подавать материал заданного сечения. Рассмотрим закономерности усушки и вызываемые ею деформации пиломатериалов (рис.4.1).

Например, в сыром бревне сделаны пропилы (рис.4.1 а слева). Плоские доски, полученные из левой половины бревна, в результате неодинаковой усушки древесины обеих пластей приобретут покоробленность (желобчатую форму у левой пласти каждой доски и выпуклую – у правой). Причина такой деформации у центральной доски 1–2–4–3 заключается в том, что пласт 1–2, как радиальная, усохнет по ширине доски меньше, чем пласт 3–4 (имеющая в середине тангенциальный и полурадимальный участки пропила).

У остальных досок левая пласт (тангенциальной выпилки) усохнет больше, чем правая, поэтому стянет и искривит доску в поперечном направлении. В этом заключается исходная причина определенного коробления досок во время сушки.

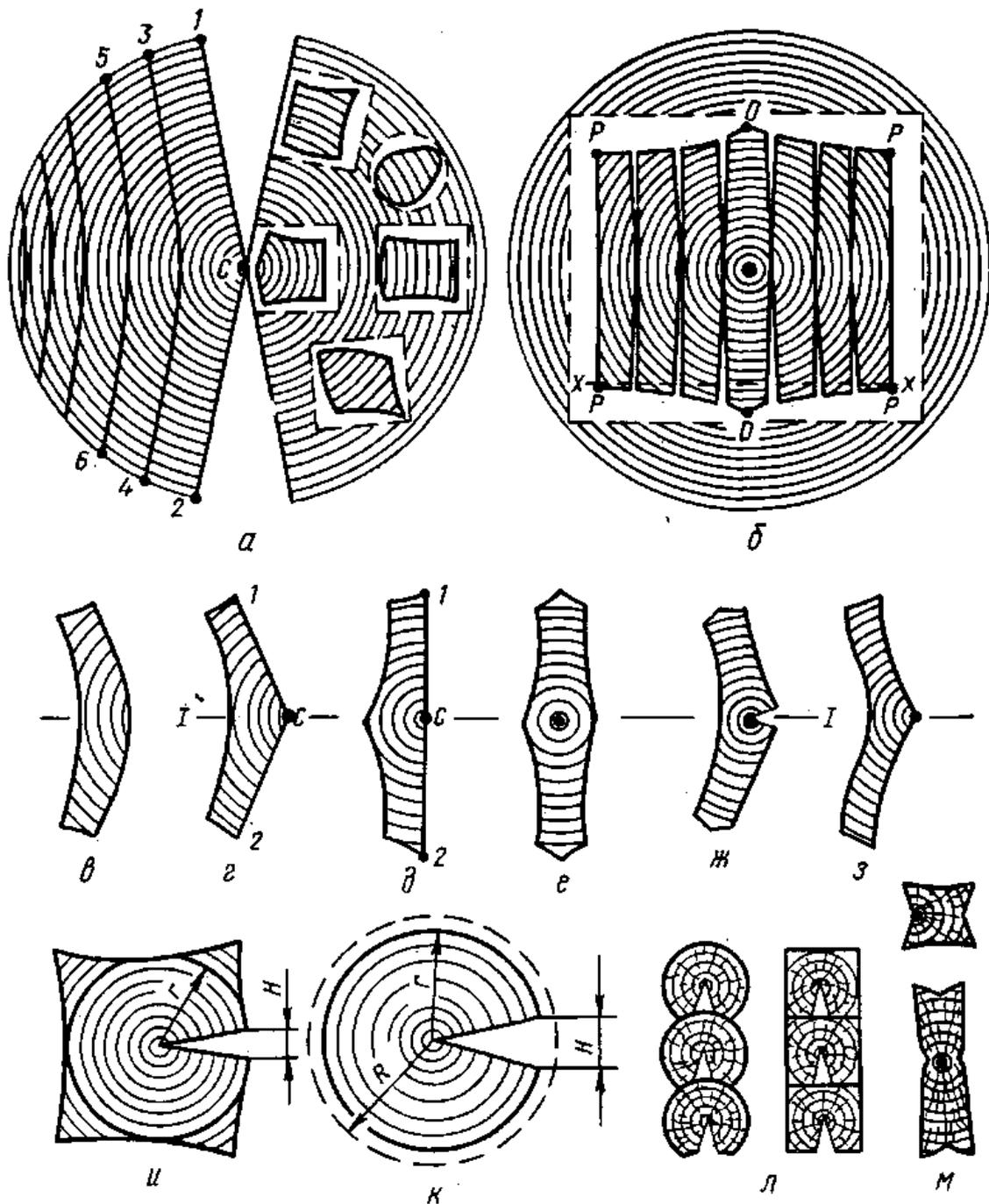


Рис. 4.1. Поперечное деформирование сортиментов древесины из-за различной ее усушки:

*а* – вырезанных в разных зонах бревна; *б* – досок в разных зонах постава; *в*, *г* – при свободном деформировании боковой и центральной досок в постава; *д* – в зажатом плоском состоянии центральной доски; *е* – сердцевинной доски без растрескивания (тонкой); *ж* – с образованием трещины (у толстой); *з* – крыловидной формы; *и*, *к* – растрескивание сердцевинных сортиментов (бруса, бревна); *л* – метод укладки в строительную конструкцию сердцевинных сортиментов с намеченным пропилом – направлением растрескивания; *м* – разбухание при увлажнении пересушенных сортиментов прямоугольной формы

**Деформация сечений квадратных брусков и круглых стержней** (рис. 4.1 а справа). По причине неодинаковой усушки по направлениям годовичных слоев и радиальному, сечения брусков в результате просыхания древесины деформируются. В частности, нижний брусок с диагоналями по годовичным слоям, а также в радиальном направлении окажется ромбовидным; стержень круглого сечения приобретет овальное, точнее яйцевидное, сечение.

**Разнотолщинность досок из постава.** На рис. 4.1 б показана деформация одинаковых до сушки досок, выпиленных из прямоугольного сырого бруса и затем высушенных зажатыми между прокладок. При этом из-за различной усушки сердцевинная доска 0–0 окажется самой широкой (радиальное направление годовичных слоев по ее ширине) и одновременно самой тонкой – у обеих кромок. Самые крайние боковые доски будут наиболее узкими из бруса, но наиболее толстыми. Однако все сухие доски этого постава будут одинакового сечения – сохранится начальная масса древесинного вещества (имеется в виду одинаковая конечная их влажность).

**Разрыв сердцевинных сортиментов.** Сердцевинный брусок после высушивания (рис. 4.1 и) потеряет плоскостность граней и приобретет клиновидную трещину с ее вершиной в сердцевине бруса. Раскрытие трещины  $H$  легко выявляется с учетом изменения радиусов и длин вписанных в квадрат бруса окружностей до и после усушки.

Деревянные массивные стены (рис. 4.1 л) выполняют из заранее надрезанных продольно бревен (на глубину  $\approx 2/3$  радиуса), что предопределяет направление будущих клиновидных трещин. Положительные особенности такой конструкции стен: предотвращение проникновения атмосферных и иных вод внутрь стен и, следовательно, предотвращение гниения; сохранение механической прочности стен, имеющих лишь вертикальные надрезы, создание утепленной конструкции с полостями внутри стены, скрытие дефекта (трещин), гарантия от появления других радиальных трещин в элементах стен. У брусьев надрезают самую близкую к сердцевине пласт, если смотреть с их торцов.

**Стрела покособленности.** Величина свободной поперечной покособленности досок характеризуется стрелой их прогиба  $f$ , мм, определяемой для наиболее изогнутой в поперечном направлении центральной доски (см. рис. 4.1 а, 1–2–4–3) по формуле акад. А. В. Гадолина

$$f = \frac{\pi}{4} W (Y_{tg} - Y_r), \quad (4.1)$$

где  $W$  – ширина доски, мм.

Например, при  $W = 200$  мм; разности усушек для сосны  $Y_{tg} - Y_r = 0,31 - 0,18$ ; значения  $\pi/4 = 0,785$  определим

$$f = 0,785 \cdot 200 \cdot (0,31 - 0,18) = 20,41 \text{ мм.}$$

При увлажнении сухих досок они деформируются в противоположном направлении (рис. 4.1 м, е).

Доски, выпиленные в поставе дальше от центральной, меньше коробятся. Минимально коробится на одинаковой ширине боковая доска поставы. Это следует из учета разнотолщинности всех досок, изображенных на рис. 4.1 а, поскольку у кромок они тоньше, а по середине своей ширины – толще (здесь проходит радиальное, с наименьшей усушкой, направление в досках – горизонталь из сердцевины С).

**Качество сердцевинных досок.** Эти доски (рис. 4.1 е, ж) считаются низкокачественными. Однако если вырезать сердцевину, будут получены две высококачественные узкие доски радиальной распиловки, почти не подвергающиеся короблению и растрескиванию во время сушки. Такая высококачественная пилопродукция используется для изготовления музыкальных инструментов, паркета, бочек для жидкостей и т. п.

**Сушка сердцевинных сортиментов.** Существенным дефектом крупных сортиментов, содержащих сердцевину, является неизбежное радиальное их растрескивание во время сушки (рис. 4.1 ж, и). Причина тому, как и короблению пиломатериалов, – повышенная тангенциальная усушка по сравнению с радиальной. Вследствие этого возникает дефицит влаги во внешней зоне сечения материала (по направлению годичных слоев) с избытком влаги в середине сортимента, распирающей внешнюю зону.

С учетом вязкости древесины, при повышенной ее температуре во время сушки тонкие сердцевинные доски удается высушивать без растрескивания, если замедлить сушильный процесс (т. е. удлинить время релаксации напряжений, возникающих в высушиваемой древесине).

### **4.3. Предупреждение влажностных деформаций пиломатериалов и заготовок**

**Продольное коробление пиломатериалов и заготовок.** Вследствие анизотропного строения древесной ткани, крайне неравномерной ее структуры (сучков, завитков, крени и т. п.), а также из-за перерезания волокон древесины – при продольной распиловке нецилиндрических бревен и бревен с наклоном волокон – возникает многообразная продольная покособленность пиломатериалов и заготовок (рис.4.2).

Используя явление вязкости и пластичности древесины в нагретом состоянии, можно предотвратить все эти деформации, если выдерживать материал во время сушки в плоском хорошо зажатом состоянии. В этих целях необходимо правильно укладывать материал в штабель и прижимать сверху высушиваемую древесину. Для предупреждения коробления пиломатериала применяют в верхних рядах штабеля, кроме того, механические прижимы, грузы и другие приемы.

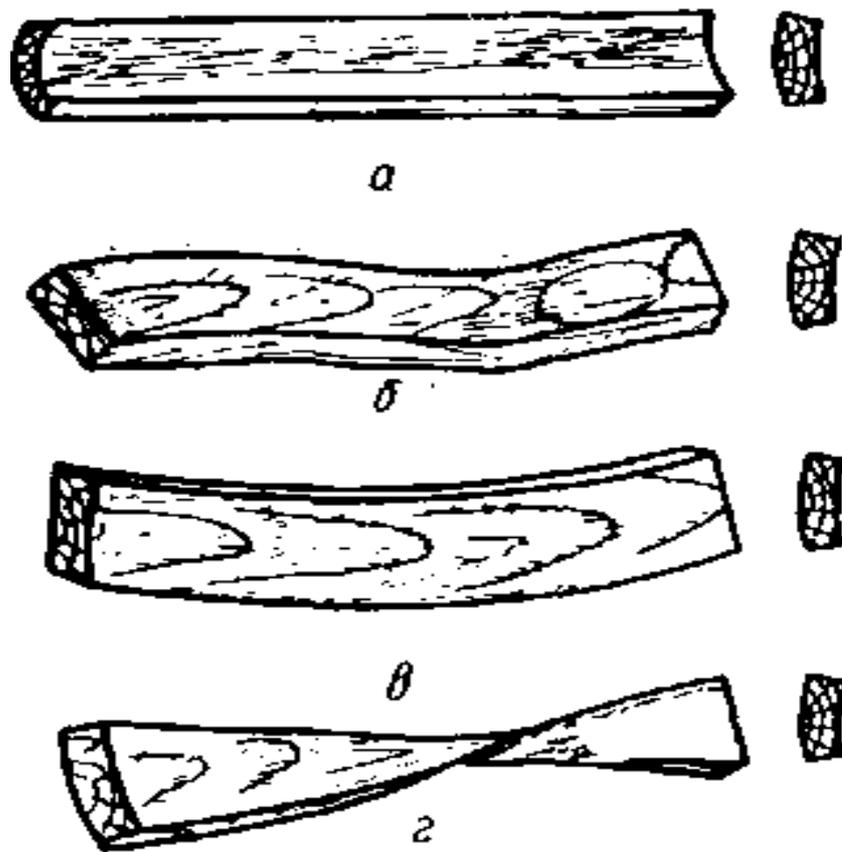


Рис.4.2. Продольная покоробленность пиломатериалов:  
 а – по пласти; б – сложная покоробленность;  
 в – по кромке; г – крыловатость

**Коробление деталей в щитах.** При сезонных, погодных и других отклонениях насыщенности пара  $\varphi$  в окружающей среде происходит изменение влажности, а следовательно, и поперечных размеров заготовок и даже деталей в изготовленных изделиях, находящихся в такой изменившейся атмосфере.

Щит, собранный из досок (или брусков) с односторонним ориентированием внешних пластей. Деформация возникает при досушке деталей в щите; в случае их увлажнения щит будет деформироваться в противоположном направлении. Если щит собирать с разносторонней ориентацией пластей смежных деталей, в нем возникнет небольшое коробление отдельных его деталей; однако во всех случаях при отклонениях влажности будет изменяться размер щита по ширине.

Кардинальным мероприятием для предотвращения деформирования деталей в изделиях будет хорошая просушка древесины и стабильность состояния воздуха в условиях ее эксплуатации.

**Ослабление шиповых соединений в изделиях.** Наиболее опасно применение недосушенной древесины в зоне зарезки шипов. В таких

случаях древесина медленно досыхает в готовом изделии, клеевая прослойка нарушается и шиповое соединение теряет прочность (рис.4.3).

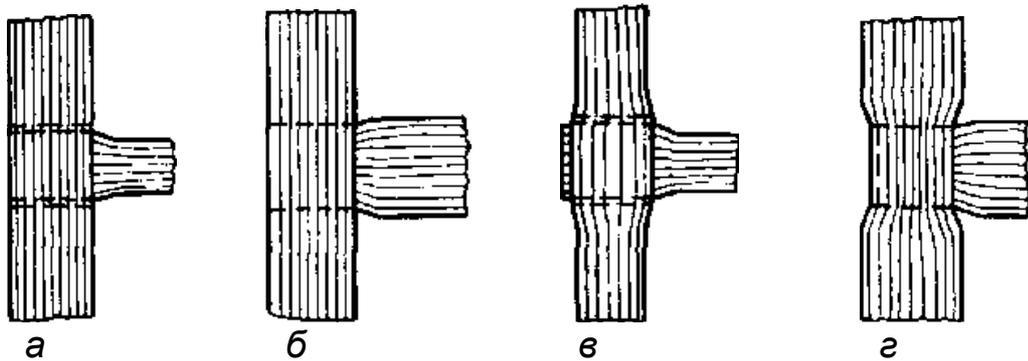


Рис. 4.3. Деформация шиповых соединений

В случае небольшой пересушки древесины шипа (рис.4.3 б) происходит его упрочнение из-за постепенного разбухания древесины в гнезде. Однако при деформациях обеих сопрягаемых деталей (рис.4.3 в, г) вероятно разрушение клеевой прослойки и всего соединения; наиболее часто наблюдается выход концевого участка сквозного шипа из гнезда (рис.4.3 в). При недосушке древесины не достигается полной надежности соединения, даже с применением двойного шипа. Поэтому необходимо высушивать древесину до заданной ее конечной влажности; желательна пересушка на 3 – 4% концевых участков заготовок, предназначенных для резки шипов.

**Нарушение усовых соединений.** При недосушке обеих деталей они в условиях эксплуатации будут усыхать, сужаться по ширине, образуя щель у внутреннего угла соединения (рис. 4.4 а), и, наоборот, при пересушке детали будут увлажняться, разбухать и щель возникнет у наружного угла (рис. 4.4 б). Ширина такой щели  $f$  составит  $1,4 U$  мм. Так, если ширина деталей по 100 мм и усушка каждой составляет 4 %, т. е.  $U=0,04 \cdot 100 = 4$  мм, то ширина щели  $f = 1,4 \cdot 4 = 5,6$  мм.

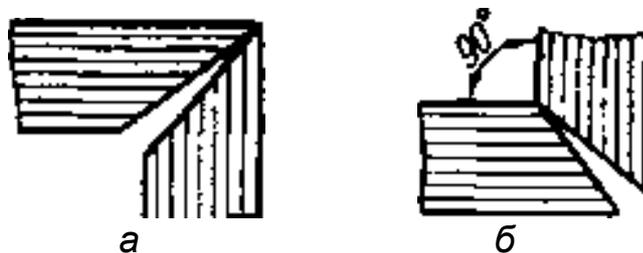


Рис.4.4. Деформация усового соединения

**Ослабление шкантовых, нагельных (деревянный гвоздь) и других подобных соединений.** Чтобы такие соединения не ослаблялись, а упрочнялись в процессе эксплуатации изделий, они должны разбухать в конструкции, уплотняя и упрочняя связь сопрягаемых деталей.

В этих целях они должны плотно вставляться в гнездо (на клею) в пересушенном состоянии, создавая затем дополнительный влажностный натяг. Изделия, изготовленные с применением недосушенных вставных шипов, недолговечны.

**Деформации поперечных отверстий в деталях.** Так как в продольном к волокнам направлении древесина практически не усыхает, то размер отверстия по длине волокон древесины неизменен до и после сушки.

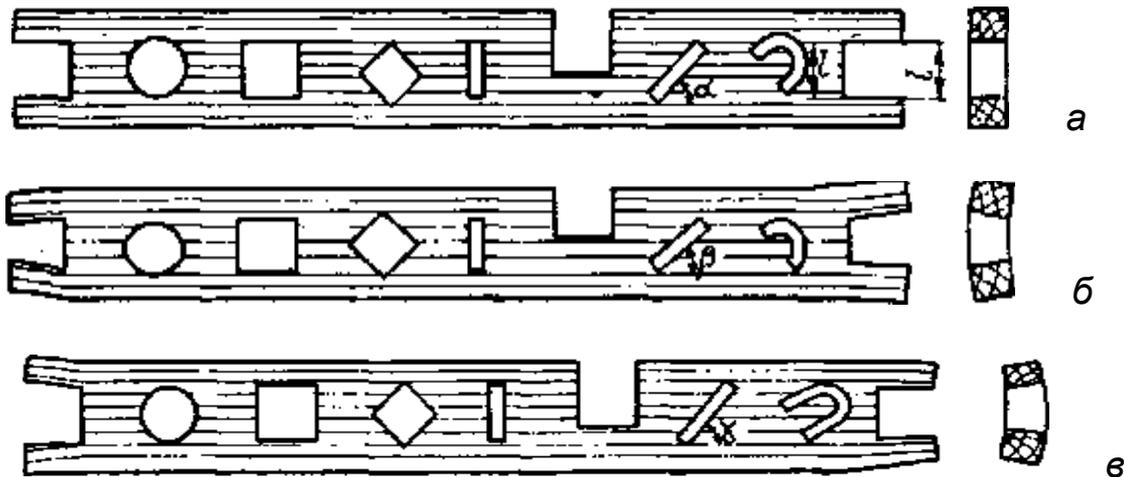


Рис 4.5. Деформации поперечных отверстий в деталях

Существенное значение приобретает сохранение размеров отверстий (рис. 4.5 а), в некоторых условиях возможно небольшое их уменьшение для упрочнения соединений.

На рис. 4.5 б показаны отверстия в детали, досыхающей после их выборки. При этом круглое отверстие превратится в суженное овальное, квадратное – в прямоугольное и т. д. Критерием для правильного ответа на вопрос о характере деформации отверстия является изменение поперечного размера древесины по ширине детали у торцевой кромки рассматриваемого отверстия.

На рис. 4.5 в изображен пересушенный, т.е. разбухающий в дальнейшем, образец материала с отверстиями.

#### 4.4. Динамика сушки (движение влаги в древесине)

**Поток влаги в древесине.** При влажности выше 30% (предел гигроскопичности) влага перемещается в древесине в основном в виде жидкости. В гигроскопической же области, т. е. при влажности ниже 30 %, она мигрирует также в виде пара – и тем больше, чем суше и более нагрета древесина. Именно поэтому постоянная во времени температура в центре высушиваемого сортамента будет пониженной: здесь происходит образование пара, т. е. возникает расход тепла фазового перехода.

Движущими силами перемещения влаги могут быть: ускорение силы тяжести, осмотическое давление, капиллярное давление, диффузия, термодиффузия, давление пара в древесине и др.

Свойство материала перемещать внутри себя влагу называется *влажностепроводностью*. В древесине различается влажностепроводность молярная, капиллярная и диффузионная. Молярная (поточная) влажностепроводность проявляется при высокой влажности древесины (например, влага вытекает из очень влажной, вертикально установленной нагретой доски). Капиллярная влажностепроводность (основная) наблюдается при влажности в диапазоне 110–25%. Диффузионная влажностепроводность проявляется во время сушки древесины при ее локальной (местной) влажности ниже 25%.

Для расчета процессов высыхания древесины необходимо располагать данными о величине *коэффициента влажностепроводности*, от которого зависит интенсивность изотермического переноса связанной воды.

Коэффициент влажностепроводности определяется опытным путем. Его размерность аналогична размерности коэффициента температуропроводности ( $\text{м}^2/\text{с}$  или  $\text{см}^2/\text{с}$ ), а величина зависит от температуры, породы древесины, местоположения образца в стволе, направления тока влаги относительно волокон, от плотности древесины. Некоторое влияние на него оказывает влажность, но это влияние невелико.

Температура относится к факторам, влияние которых на коэффициент влажностепроводности наиболее существенно. При повышении температуры оно заметно возрастает. Это объясняется увеличением коэффициента диффузии водяного пара и снижением вязкости жидкой влаги в капиллярах.

Порода древесины также существенно влияет на коэффициент влажностепроводности. Объясняется это особенностями строения клеток, а также тем, что древесина разных пород имеет различную плотность, при повышении которой интенсивность влажностепереноса уменьшается из-за уменьшения относительного объема капилляров.

Местоположение образца в стволе имеет значение для древесины ядровых и спелодревесных пород. Коэффициент влажностепроводности ядра и спелой древесины ниже, чем заболони, что объясняется закупоркой пор тиллами и смолами.

Анизотропное строение древесины определяет ее разную влажностепроводность в различных направлениях относительно волокон. Наибольшую величину имеет коэффициент влажностепроводности вдоль волокон. Поперек волокон он значительно меньше, причем радиальная влажностепроводность несколько превышает тангенциальную вследствие влияния сердцевинных лучей. У пород с широкими лучами (бук, дуб) отношение коэффициентов влажностепроводности в указанных направлениях составляет соответственно 1,7 и 1,5; а у сосны с ее очень узкими

лучами, – только 1,15. Коэффициент влагопроводности древесины вдоль волокон в 15–20 раз больше, чем в тангенциальном направлении поперек волокон, т. к. влага перемещается по направлению ее основного тока в растущем дереве.

**Кривые влажности древесины.** Кривые распределения влажности по толщине материала во время сушки называют кривыми влажности (рис. 4.6). Они показывают, что в начале процесса сушки влага испаряется с поверхностной зоны материала; здесь влажность древесины быстро снижается до предела гигроскопичности (в нагретом состоянии примерно 25%), а затем еще ниже, т. е. начинается усушка.

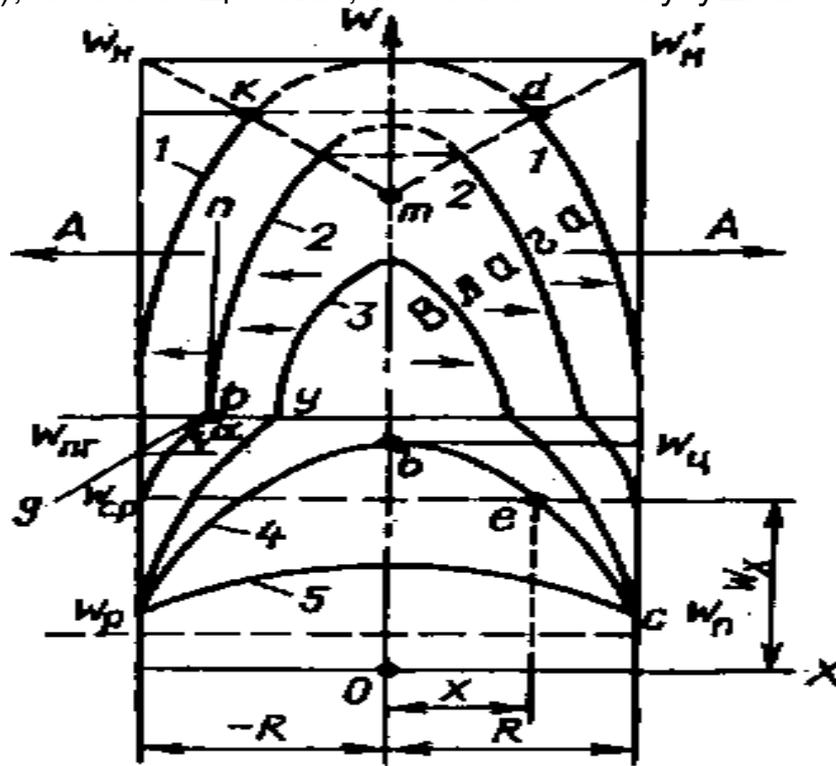


Рис. 4.6. Распределение влажности древесины по толщине материала во время сушки:

1-5 – кривые влажности в последовательные периоды сушки материала;  $W_p$  – горизонталь равновесной влажности древесины;  $W_{п.г}$  – горизонталь предела гигроскопичности;  $W_n - t - W'_n$  – зона молярной влагопроводности

Подсушенная поверхностная зона постепенно углубляется, одновременно у ряда древесных пород происходит молярное перетекание части свободной влаги из центра к поверхности материала, как это показано пунктирной горизонталью  $kd$  (вместо кривой  $kwd$ ).

На рис. 4.6 нанесены кривые влажности 1-5 последовательного, например ежесуточного, снижения содержания влаги (стрелки  $A$  — направление ее потока) по сечению плоского материала (вид с торца, без кромки). Форма этих кривых различна: выше горизонтальной линии  $W_{п.г}$

(предел гигроскопичности) перемещается свободная влага, а ниже нее – гигроскопическая.

Для диффузионного потока влаги, т. е. ниже  $W_{п.э}$ , коэффициент влагопроводности принимают постоянным, не зависящим от ее влажности. При этих условиях, в стадии регулярного режима кривые влажности 4 и 5 имеют вид снижающихся к  $W_p$  парабол и скорость сушки продолжает снижаться.

#### 4.5. Брак сушки

В процессе высушивания пиломатериалов происходит коробление и растрескивание. И причины возникновения, и меры предупреждения этих видов брака различны.

**Коробление** происходит вследствие анизотропного строения древесины (см. рис. 4.2). Радикальная мера предупреждения коробления – надежное зажатие досок и заготовок в штабеле, с тем чтобы они высушались в хорошо зажатом плоском состоянии. Таким образом, коробление появляется при неправильной укладке материала в штабель, т. е. предопределяется на погрузочной площадке.

**Растрескивание** наблюдается при неудовлетворительных ведении и контроле процесса сушки, когда в поверхностной зоне материала возникают чрезмерные упругие деформации. Трещины бывают торцовые и пластевые. Они всегда направлены по радиусу, т. е. перпендикулярно к годовичным слоям, и образуются на торцах и на наружной пласте доски (рис. 4.7 а).

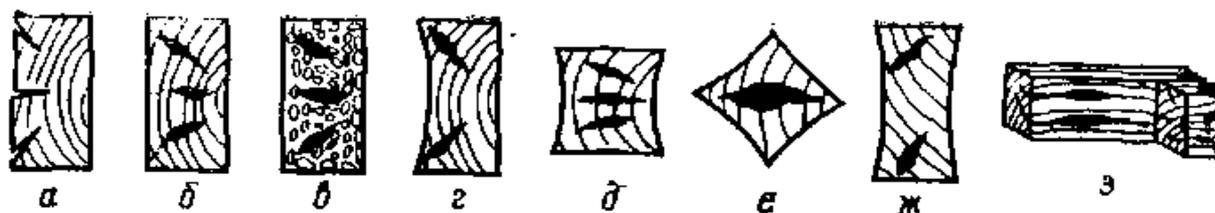


Рис. 4.7. Растрескивание пиломатериалов при сушке:

*a* – наружные трещины; *б* – заглубление наружных трещин и переход их в раковины; *в* – различная деформация клеток и сосудов древесины в сечении доски; *г* – утолщение досок у кромок; *д, е* – образование раковин у брусков; *ж* – прикромочные раковины в досках; *з* – приторцовые раковины

Торцовые трещины возникают в самом начале сушки на свежоторцованных поверхностях. Способ предупреждения – замедление испарения влаги с торцов, например закрыванием торцов заготовок (укладка смежных заготовок впритык по длине, покрытие торцов щитами, замазками и т. п.) и даже специальное увлажнение торцов.

Пластовые трещины образуются во время первой стадии сушки толстых досок, и тем более твердых пород. Необходимо тщательно наблюдать за появлением трещин и не допускать развития (см. рис. 4.7 а) с начала первой стадии процесса сушки.

Раковины, т. е. внутренние пустоты, часто образуются при сушке дубовых и буковых сортиментов средних и тем более значительных толщин. Они возникают во второй стадии сушки и даже в высушенной древесине, при выравнивании влажности по сечению материала. Чем больше накопится остаточных деформаций растяжения в наружной зоне и чем больше упрессуется внутренняя зона в первой стадии сушки, тем значительнее опасность возникновения раковин и тем большей будет их величина во второй стадии процесса.

Практические выводы:

– рекомендуется медленное и осторожное подсушивание в камерах (при пониженных температурах) толстых сортиментов, особенно твердых пород;

– желательна форсированная сушка тонких, не растрескивающихся сортиментов, у которых в таких режимных условиях будут как меньше покоробленность и усадка.

**Контрольные вопросы:** 1. Какие физические явления включает в себя процесс сушки? 2. По каким принципам классифицируются способы сушки? Какие виды сушки существуют? 3. Какие влажностные деформации возникают в процессе сушки древесины? 4. Что такое стрела покоробленности? Как определяется ее значение? Что влияет на ее величину? 5. Как можно предупредить влажностные деформации пиломатериалов и заготовок? 6. Что такое влагопроводность? Виды влагопроводности. 7. Что такое коэффициент влагопроводности? Как он находится? От чего зависит его значение? 8. Что такое кривые влажности? Как влажность распределена по толщине материала во время сушки? 9. Какие существуют виды брака сушки?

## Глава 5. Физические основы пропитки древесины

### 5.1. Физические явления в процессах пропитки древесины

**Пропитка** – это процесс введения в древесину веществ, которые изменяют ее свойства (повышают биостойкость и огнестойкость, снижают электропроводность, гигроскопичность, увеличивают прочность и т. д.).

Пропитывающие вещества чрезвычайно разнообразны по свойствам и характеру их взаимодействия с древесиной. Они могут проникать в древесину чисто механическим путем, адсорбироваться ее веществом, вступать с ним в химическую реакцию. Характер физико-химических явлений, сопровождающих пропитку, очень сложен, и они еще не вполне изучены.

В большинстве случаев пропитывающие вещества не вступают в химическую реакцию с древесиной и ею не адсорбируются. Поэтому процессы пропитки древесины можно рассматривать как совокупность следующих физических явлений:

1) движение жидкости в древесине под действием капиллярного давления;

2) движение жидкости в древесине под действием избыточного давления;

3) диффузионное перемещение молекул или ионов пропитывающих веществ в древесине по полостям клеток, заполненным водой.

Производственные процессы пропитки протекают обычно в условиях совместного действия всех указанных явлений, но относительная эффективность того или иного из них может быть различной при разных способах пропитки.

По сравнительной проницаемости для жидкостей древесина различных пород может быть условно разделена на три группы: легкопропитываемая, умеренно пропитываемая и труднопропитываемая. К первой группе относится древесина рассеянно-сосудистых пород (березы, бука), а также заболони сосны; к труднопропитываемой – древесина ели, лиственницы, пихты, ядровая древесина сосны, дуба и ясеня. Древесина других пород занимает промежуточное положение и относится к умеренно пропитываемой.

### 5.2. Движение жидкости в древесине под воздействием капиллярных сил

Известно, что равнодействующая молекулярных сил в поверхностном слое жидкости направлена внутрь этой жидкости и ее действие аналогично образованию на границе раздела жидкость – газ растянутой упругой пленки. Сила натяжения этой пленки, отнесенная к единице длины, называется **коэффициентом поверхностного натяжения ( $\sigma_n$ )**. На изогнутой

поверхности жидкости поверхностное натяжение является причиной появления добавочного (капиллярного) давления – положительного для выпуклой и отрицательного для вогнутой поверхности.

На границе соприкосновения жидкости с твердым телом ее поверхность образует (рис. 5.1 а) определенный угол  $\theta$  (острый у смачивающих и тупой у не смачивающих данное тело жидкостей), называемый краевым углом, или углом смачивания. При соприкосновении капилляра достаточно малого диаметра с жидкостью (рис. 5.1 б) в ней образуется мениск. Положительное капиллярное давление мениска (не смачивающая жидкость) вызывает снижение уровня жидкости в капилляре, а отрицательное давление, называемое также капиллярным натяжением (смачивающая жидкость), – повышение этого уровня. Пропитывающие жидкости по отношению к древесине являются, как правило, смачивающими.

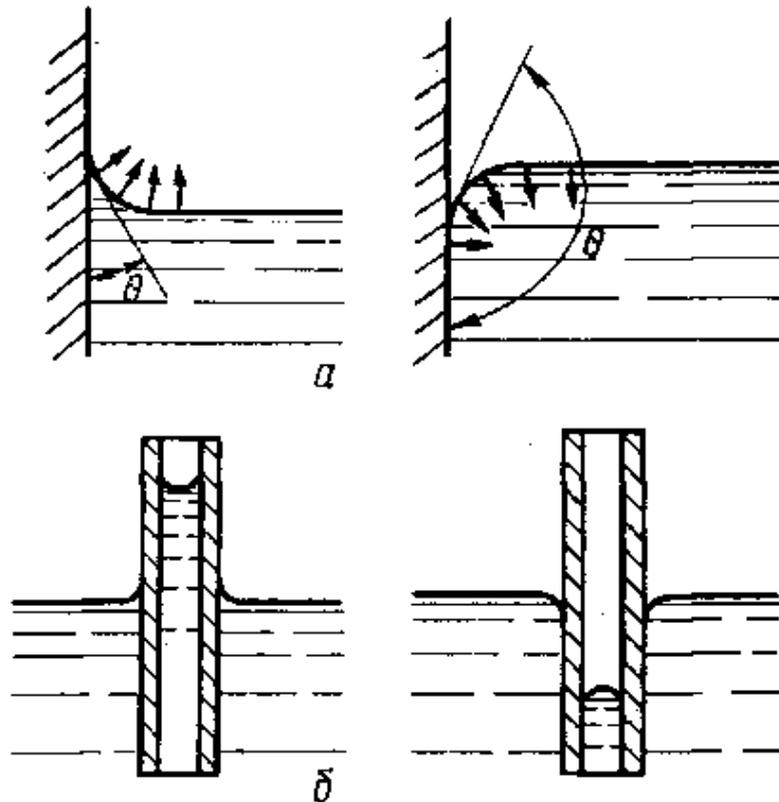


Рис. 5.1. Схемы образования менисков в капиллярах

Капиллярное давление в цилиндрическом капилляре определяется выражением:

$$p_k = \frac{2\sigma_n \cos \theta}{r}, \quad (5.1)$$

где  $r$  – радиус капилляра.

### Механизм движения жидкости в древесине под действием капиллярных сил

1. Образец древесины одним концом опущен в смачивающую жидкость, его ось ориентирована в направлении вдоль волокон, влажность не превышает предела насыщения клеточных стенок. В образце древесины условно выделим один ряд проводящих клеток (сосудов или трахеид), который можно представить в виде переходящих друг в друга макро- и микрокапилляров, имеющих радиусы  $r_1$  и  $r_2$  (рис. 5.2).

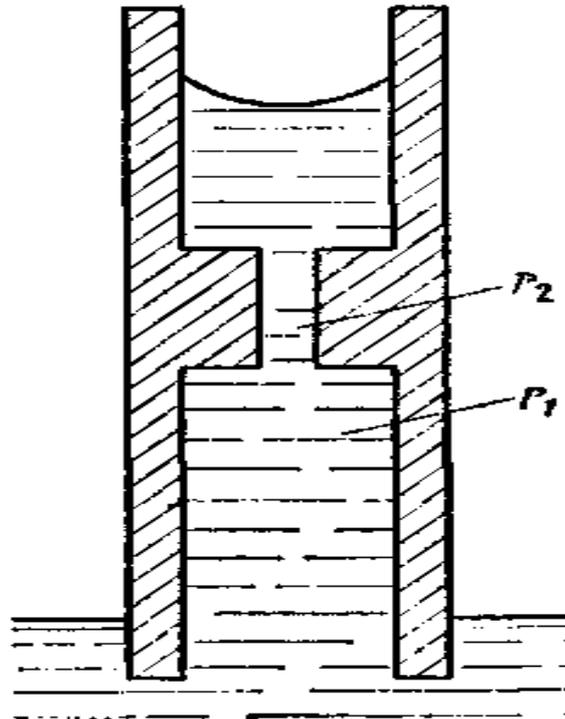


Рис. 5.2. Упрощенная схема капилляров в древесине

Под действием капиллярных сил жидкость будет заполнять полости макрокапилляров. К какому-то моменту времени  $\tau$  жидкость в капилляре находится в положении, показанном на схеме. Перепад давления, вызывающий движение жидкости вверх, обусловленный капиллярным давлением  $p_k$ , давлением силы тяжести  $p_g$  и давлением, вызываемым сопротивлением вытесняемого воздуха  $p_e$

$$\Delta p = p_k - p_g - p_e. \quad (5.2)$$

Интенсивность движения жидкости по капилляру, выражаемая ее объемной скоростью  $dV/d\tau$ , м<sup>3</sup>/с, определяется уравнением Пуазейля

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\pi r^4}{8\mu l} \Delta p, \quad (5.3)$$

где  $r$ ,  $l$  – радиус капилляра, его длина;  
 $\mu$  – вязкость жидкости.

Экспериментальные и практические данные показывают, что скорость движения жидкости по капиллярам древесины колеблется: вдоль волокон 30–150 мм, поперек волокон 0,2–3,0 мм в сутки.

Подъем жидкости в капилляре прекращается, когда капиллярное давление становится равным по абсолютной величине давлению силы тяжести. Максимальную высоту подъема жидкости можно рассчитать по следующей формуле

$$\delta_{\max} = \frac{2\sigma_n \cos \theta}{r\rho g}, \quad (5.4)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;

$g$  – ускорение свободного падения.

В древесине, как показывают расчеты, эта высота не превышает 1 м.

2. При полном погружении сортимента в жидкость ее перемещение по капиллярам происходит одновременно со всех сторон сортимента. Давление силы тяжести в этом случае практически не оказывает влияния на скорость перемещения. Однако капиллярному давлению будет противодействовать давление защемленного внутри древесины воздуха. В этом случае перепад давления, вызывающий движение жидкости, характеризуется следующим выражением

$$\Delta p = p_k + p_0 - p_e, \quad (5.5)$$

где  $p_0$  – давление окружающей древесину среды.

Величина воздушного давления  $p_e$  зависит от толщины пропитанной зоны и от формы образца. Она определяется выражениями:

для неограниченной пластины толщиной  $S = 2R$

$$p_e = p_0 \frac{R}{R - \delta}; \quad (5.6)$$

для цилиндра радиусом  $R$

$$p_e = p_0 \frac{R^2}{(R - \delta)^2}, \quad (5.7)$$

где  $\delta$  – толщина пропитанной зоны.

При равенстве капиллярного давления и давления защемленного воздуха перемещение жидкости прекратится, а глубина проникновения  $\delta$  будет максимальной.

Расчеты показывают, что эта глубина может быть равной 2–5 % толщины сортимента. Дальнейшее проникновение жидкости в древесину возможно только по мере растворения воздуха в воде и диффузии его молекул через капиллярные каналы в окружающую среду. Этот процесс чрезвычайно медленный и может длиться годами.

3. Капиллярное движение жидкости в сырой древесине, полости клеток которой полностью или почти полностью заняты свободной водой.

3.1. В сырых сортиментах длиной более 1 м, погруженных в жидкость одним торцом и установленных вертикально, движение жидкости, очевидно, невозможно.

3.2. В более коротких сортиментах или сортиментах, имеющих горизонтальное положение, жидкость будет перемещаться только по мере ее испарения с открытого торца. При этом не исключено, что интенсивность испарения будет больше интенсивности капиллярного подсоса, – и тогда значительная по длине часть сортиментов, примыкающая к открытому торцу, будет высыхать, несмотря на то что второй торец остается в контакте с жидкостью.

В сырой древесине, таким образом, капиллярное движение жидкости с торца не может иметь сколько-нибудь существенной интенсивности. В сырой же древесине, полностью погруженной в жидкость, возможность капиллярного движения вообще исключена в связи с отсутствием по объему сортимента разности капиллярных давлений.

**Вывод:** капиллярное движение жидкости в древесине без дополнительного внешнего давления на практике используется только для пропитки сухих или подсушенных сортиментов на очень небольшую глубину путем их полного погружения в жидкость. Жидкости должны быть маловязкие, хорошо смачивающие древесину, и подогретые, поскольку с повышением температуры снижается их вязкость –и повышается скорость проникновения в древесину.

Возможно также использование капиллярного движения жидкости в древесине – для пропитки ее на корню. В стволе растущего дерева подрубают заболонь и к месту подруба подают водный раствор пропитывающего вещества. За счет способности кроны к транспирации, влага поднимается по стволу и испаряется, а ее место в стволе занимает пропитывающий раствор. Такая пропитка очень сложна в организации и неравномерна.

### **5.3. Движение жидкости в древесине под действием избыточного давления**

Создание при пропитке избыточного давления (по отношению к давлению внутри древесины) возможно разными методами. Промышленное значение имеют метод выдержки предварительно нагретой древесины в холодной ванне и автоклавный метод.

1. Пропитка в ваннах с предварительным нагревом древесины отличается простотой технологических приемов. Древесину первоначально выдерживают некоторое время в горячей жидкости или нагревают другим способом, а затем помещают в ванну с холодной жидкостью, где и происходит собственно пропитка.

При нагревании возрастает давление паровоздушной смеси в полостях клеток за счет температурного расширения и роста парциального давления пара. Вследствие газопроницаемости древесины паровоздушная смесь из нее частично удаляется и давление устанавливается близким к атмосферному, причем основную долю составляет парциальное давление водяного пара, соответствующее температуре и степени насыщения пара в полостях клеток.

При последующем охлаждении древесины, полностью погруженной в жидкость, давление в полостях клеток снижается как в результате температурного эффекта, так и за счет конденсации водяного пара (давление насыщения водяного пара резко уменьшается с понижением температуры).

Давление жидкости в ванне, равное атмосферному, становится избыточным по отношению к древесине. Под действием образовавшегося перепада давления и происходит поглощение древесиной пропитывающей жидкости. Перепад давления определяется выражением

$$\Delta p = p_a - \left[ p_{н2} + (p_a - p_{п1}) \frac{T_2}{T_1} \right], \quad (5.8)$$

где  $p_a$  – атмосферное, или барометрическое, давление;

$p_{н2}$  – давление насыщения водяного пара в полостях клеток охлажденной древесины, соответствующее температуре холодной ванны;

$p_{п1}$  – парциальное давление водяного пара в полостях клеток нагретой древесины;

$T_1$  – средняя абсолютная температура нагретой древесины;

$T_2$  – то же охлажденной древесины.

Если пропитке подвергается древесина влажностью выше предела насыщения клеточных стенок, парциальное давление  $p_{п1}$  равно давлению насыщения  $p_{н1}$  при соответствующей температуре. Если же влажность древесины ниже предела насыщения, это давление определяется произведением

$$p_{п1} = p_{н1} \varphi, \quad (5.9)$$

где  $\varphi$  – равновесная степень насыщенности пара в полостях клеток, соответствующая фактической влажности древесины.

Перепад давления  $\Delta p$  по существу зависит от разности давлений  $p_{п1}$  и  $p_{н1}$ , которая в свою очередь зависит от влажности древесины, разности ее температур в нагретом и охлажденном состояниях и, в значительной степени, от уровня температуры нагретой древесины. При повышении этого уровня  $\Delta p$  существенно возрастает, даже если указанная разность температур остается такой же. Во всех случаях при пропитке в ваннах с предварительным нагревом перепад  $\Delta p$  не может быть больше барометрического давления.

2. Автоклавный метод создания избыточного давления обеспечивает более значительный перепад давления (до 1,5 МПа). Древесину загружают в герметичный автоклав, который заполняют пропитывающей жидкостью, и ее давление поднимают до требуемого уровня с помощью жидкостного насоса или компрессора. Плотность потока жидкости в древесине под действием избыточного давления пропорциональна градиенту давления  $dp/d\delta$ :

$$i = -K \frac{dp}{d\delta}, \quad (5.10)$$

где  $K$  – коэффициент проводимости древесины.

Коэффициент проводимости, кг/(м·с·Па), характеризует массу жидкости, проходящей в единицу времени через древесный образец площадью 1 м<sup>2</sup> при градиенте давления 1 Па/м. Он зависит от породы и местоположения древесины в стволе, ее температурно-влажностного состояния, направления потока жидкости относительно волокон и от свойств пропитывающей жидкости. Численные значения этого коэффициента устанавливаются экспериментально.

Пример: эмпирическая формула коэффициента проводимости заболонной древесины сосны поперек волокон для водных растворов солей:

$$K = (3,5 + 0,015W + 0,71\omega - 3,36p)10^{-9}, \quad (5.11)$$

где  $W$  – влажность древесины, %;

$\omega$  – концентрация раствора, %;

$p$  – давление жидкости, МПа.

Формула справедлива в диапазоне влажности 8–50%, температуре раствора до 60 °С, его концентрации до 15% при давлении 0,1–0,5 МПа.

**Вывод:** расчеты получаются достаточно надежными только для легкопропитываемой древесины, имеющей не слишком большую влажность. Хотя создание избыточного давления является эффективным средством введения в древесину жидкостей, однако оно не дает возможности производить сплошную пропитку древесины любых пород и во всех случаях. Хорошо пропитывается под действием внешнего давления только древесина безъядровых листовых пород и заболонь ядровых пород влажностью, не превышающей 50–60%. Очень сырые сортаменты и сортаменты труднопропитываемых пород требуют перед пропиткой проведения дополнительных операций по подготовке древесины.

#### 5.4. Диффузия пропитывающих веществ в древесину

Если сырая древесина погружена в раствор соли или покрыта пастой, замешенной на растворе, молекулы или ионы соли диффундируют из раствора в воду, заполняющую полости клеток. Происходит так называемая диффузионная пропитка, которая, очевидно, неприменима для древесины, не содержащей (или содержащей мало) свободной воды.

Плотность диффундирующего потока характеризуется уравнением Фика

$$i = -D \frac{d\omega}{dx}, \quad (5.12)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$d\omega/dx$  – градиент концентрации вещества в воде, находящейся в полостях клеток,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{м})$ .

Коэффициент диффузии тех или иных веществ в древесину зависит от ее влажности и температуры, направления потока относительно волокон, вязкости растворителя, размера диффундирующих молекул или ионов.

Диффузия молекул или ионов пропитывающего вещества в капиллярной системе древесины протекает значительно медленнее, чем в свободном растворе, т. к. лишь часть ее поперечного сечения заполнена жидкостью и движущиеся частицы вынуждены преодолевать дополнительные сопротивления при прохождении через мембраны пор. Расчетами установлено, что коэффициенты диффузии для свежесрубленной древесины хвойных пород могут определяться из отношений:

в направлении поперек волокон  $D_{\perp} = 0,145D_0, \quad (5.14)$

в направлении вдоль волокон  $D_{\parallel} = 0,649D_0, \quad (5.13)$

где  $D_0$  – коэффициент диффузии для свободных растворов (справочные данные).

Соотношения 5.13 и 5.14 дают лишь ориентировочные значения коэффициентов диффузии вещества в древесине. Более точно они определяются экспериментально. Например: эмпирические формулы коэффициентов диффузии фтора и мышьяка (широко используемых при пропитке),  $\text{м}^2/\text{с}$  в заболонной древесине сосны поперек волокон:

для фтора

$$D_{\phi} = (1,955 + 0,04W + 0,005t + 0,0044t^2)10^{-11}, \quad (5.15)$$

для мышьяка

$$D_m = (0,332 + 0,015W + 0,005t + 0,0021t^2)10^{-11}, \quad (5.16)$$

Из формул видно, что коэффициенты диффузии возрастают с повышением температуры и влажности древесины.

Например: в цилиндрический древесный сортимент радиусом  $R$  (рис. 5.3) с заболонью толщиной  $\delta$  введен путем пропитки под давлением раствор вещества определенной концентрации на глубину  $\eta$ . После пропитки вещество из зоны глубиной  $\eta$  диффундирует только в зону заболони глубиной  $\nu = \delta - \eta$ , т. к. вещество на поверхность сортимента не поступает, а диффузия в ядро (зона глубиной  $R - \delta$ ) практически отсутствует, так как коэффициент диффузии в ядровую древесину из-за ее низ-

кой влажности и пониженной проницаемости на 2–3 порядка меньше, чем в заболонную.

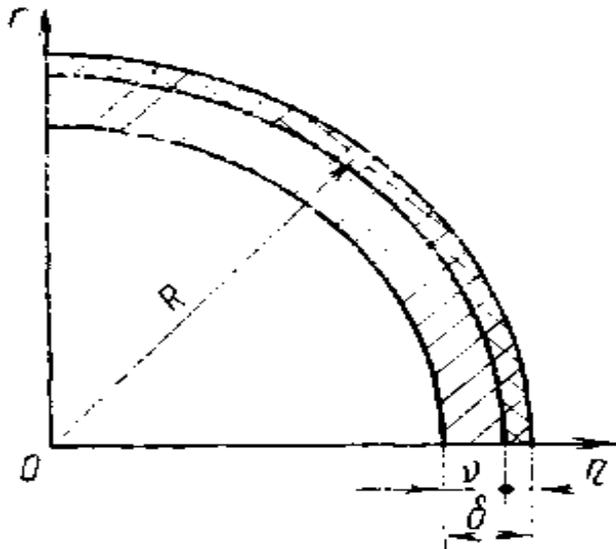


Рис. 5.3. Схема к анализу процесса диффузионной пропитки

Эмпирические расчеты позволили установить, что концентрация вещества на внутренней границе зоны глубиной  $\eta$  на всем протяжении процесса приблизительно постоянна и равна

$$\omega_{\eta} = \bar{\omega} \left( \frac{\eta}{\delta} \right), \quad (5.17)$$

где  $\omega$  – средняя начальная концентрация в зоне начальной пропитки глубиной  $\eta$ .

Рассматривая соотношение как граничное условие для зоны диффузии глубиной  $\nu$ , получаем приближенное уравнение продолжительности процесса диффузии, необходимой для доведения концентрации вещества на внутренней границе заболони (т. е. зоны толщины  $\delta$ ) до заданной величины  $\omega_{\delta}$ :

$$\tau = \frac{\nu^2}{D} \ln \frac{\omega_{\eta}}{\omega_{\eta} - \omega_{\delta}}. \quad (5.18)$$

С помощью этого уравнения можно также определять концентрацию  $\omega_{\delta}$ , которая будет достигнута на внутренней границе заболони за заданное время  $\tau$ .

Важным показателем процесса пропитки является поглощение  $\Pi$ , кг/м<sup>3</sup>, характеризующее массу сухого пропитывающего вещества, введенного в единицу объема древесины. Между концентрацией вещества в воде, содержащейся в древесине,  $\omega$  и поглощением  $\Pi$  существует зависимость:

$$\omega = \frac{\Pi \rho_{\delta}}{\rho_{\delta}(u - u_{п.н})} = \frac{10^5 \Pi}{\rho_{\delta}(W - W_{п.н})}, \quad (5.19)$$

где  $\rho_b$  – базисная плотность древесины, кг/м<sup>3</sup>;  
 $W$  – влажность древесины к моменту обработки, %;  
 $u$  – влагосодержание древесины, кг/кг;  
 $\rho_e$  – плотность воды (1000 кг/м<sup>3</sup>).

При пропитке древесины водными растворами в нее вводится под давлением некоторое количество раствора. Плотность древесины при этом возрастает на величину  $V_p 1000$ , где  $V_p$  – объем раствора, введенного в единицу объема древесины. Концентрация же вещества в древесине соответственно уменьшается по сравнению с концентрацией вводимого в нее раствора и определяется по выражению

$$\omega = \frac{10^5 V_p \omega_c}{10^5 V_p + \rho_b (W - W_{п.н})}, \quad (5.20)$$

где  $\omega_c$  — концентрация вещества в растворе, вводимом в древесину.

Поскольку величина поглощения  $\Pi = V_p \omega_c$ , выражение 5.20 после преобразований может быть представлено в виде

$$\omega = \omega_c \frac{10^5 \Pi}{10^5 \Pi + \rho_b \omega (W - W_{п.н})}. \quad (5.21).$$

**Контрольные вопросы:** 1. Что такое пропитка древесины? Какие физические явления включает в себя процесс пропитки? 2. На какие группы по сравнительной проницаемости жидкостями древесины разделяют породы? 3. Что такое коэффициент поверхностного натяжения и угол смачивания? 4. Каков механизм движения жидкости в древесине под действием капиллярных сил. 5. Раскройте механизм движения жидкости в древесине под действием избыточного давления. 6. Раскройте механизм диффузии пропитывающих веществ в древесину. 7. Что такое поглощение? От чего зависит его величина?

## Глава 6. Резонансные свойства древесины

### 6.1. Основные требования к свойствам резонансной древесины

#### 6.1.1. Общее понятие о резонансной древесине

**Резонансной** принято называть древесину, применяемую для изготовления музыкальных инструментов, точнее основной их звукоизлучающей детали – деки. Хотя в природе немало других материалов, обладающих акустическими свойствами, даже превосходящими древесину по силе излучаемого звука, по нежности и тембровой окраске звучания, пока не найдено достойного ее заменителя и вряд ли это будет сделано в обозримом будущем.

Однако далеко не каждое дерево и не во всех условиях формирует резонансную древесину; даже в пределах одной породы дерева, как и люди, обладают разным уровнем «музыкальных способностей».

Термин *резонансная древесина*, если судить строго, неправилен как с физической, так и с технической точек зрения. Под резонансом, как известно, в физике подразумевается возбуждение колебаний в системе, когда в случае совпадения частот двух тел и непосредственной их близости колебание одного передается другому. Поскольку длина звуковых волн, распространяющихся по деке поперек волокон, весьма велика по сравнению с расстоянием между волокнами древесины, то следует рассматривать не как «струнную» систему, а как целостный материал. Лишь 3 – 5% общей энергии, подводимой от струны к деке, излучается в окружающую среду (воздух) в виде звука, а значительная часть ее теряется внутри материала деки, в местах закрепления на корпусе инструмента.

Следовательно, называя древесину, используемую для изготовления дек музыкальных инструментов, *резонансной*, следует понимать это слово несколько в ином значении, чем принято считать в физике. Очевидно, оно более близко по смыслу французскому *resonance* или латинскому *resono*, что означает «звучу в ответ». Иными словами, древесину, используемую для дек, называют резонансной за ее акустическую отзывчивость в широком диапазоне частот, придающую особую, свойственную только данному материалу тембровую окраску музыкальному звучанию инструмента.

Поэтому используемую в этих целях древесину можно считать в строгом и узком техническом значении «дечной», но широкое применение в практике и технической литературе нашло сегодня все же название «резонансная древесина».

#### 6.1.2. Параметры резонансной древесины

Дека должна обеспечить наилучшее излучение звуков всех частот, передаваемых от струн. Поэтому необходимо определить те физико-механические параметры, которые характеризуют максимальное излу-

чение звуковой энергии древесиной при данной конфигурации деки (включая закрепление и точки действия струн).

Поскольку деки музыкальных инструментов имеют весьма разнообразные и сложные формы, в практике принято, что дека «приравняется» к плоской пластинке эллиптической формы.

Основная сложность, которая касается древесины, – это ее анизотропность, т.е. различие физико-технических свойств по трем осям симметрии: вдоль волокон, в радиальном и тангенциальном направлениях.

Академик Н.Н. Андреев рассчитал мощность излучения деки, Вт

$$N = \frac{F^2}{2} \frac{r_2}{\left(\frac{q}{f} - mf\right)^2 + (r_1 + r_2)^2}, \quad (6.1)$$

где  $F$  – амплитуда колебаний, м;

$r_1$  – коэффициент внутреннего трения (сопротивления) материала;

$r_2$  – коэффициент излучения;

$q$  – коэффициент упругости при прогибе деки;

$m$  – масса деки, кг;

$f$  – частота колебаний, Гц.

Учитывая, что коэффициент  $r_1$  значительно больше, чем  $r_2$ , и заменив  $\left(\frac{q}{f} - mf\right)$  на  $k$ , эту формулу можно представить в виде

$$N = \frac{F^2}{2} \frac{r_2}{k^2 + r_1^2}. \quad (6.2)$$

Следовательно, для наибольшей отдачи энергии воздуху  $N_{max}$  потери на внутреннее трение  $k$  и  $r_1$  должны быть наименьшими, а коэффициент излучения  $r_2$  – наибольшим.

Если представить  $k$  в другом выражении, а именно через массу и собственную частоту материала  $f_0$ , то

$$k = \frac{m}{f} (f_0^2 - f^2). \quad (6.3)$$

Из этого следует, что при постоянной собственной частоте колебаний деки музыкального инструмента масса его должна быть наименьшей.

Чтобы излучение было не искаженным (для сохранения чистоты звучания), необходимо условие, при котором собственная частота системы  $f_0$  была бы как можно более высокой.

Таким образом, последние существенные требования можно выразить как соотношение  $f_0/m$ , причем значение его должно быть наибольшим.

Используя возможность выражения собственной частоты системы в виде  $f_0^2 = q/m$ , можно преобразовать его:

$$\frac{f_0}{m} = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{q}{m}} = \sqrt{\frac{q}{m^3}}. \quad (6.4)$$

Требования оптимального излучения материала:

- 1) потери на внутреннее трение  $r_1$  должны быть наименьшими;
- 2) коэффициент излучения  $r_2$  должен быть максимальным;
- 3) масса деки должна быть наименьшей (при постоянной собственной частоте колебаний);
- 4) при сравнительно малой массе дека должна обладать лучшими упругими свойствами.

Коэффициент упругости  $q$  представляет собой функцию модулей упругости  $E$  по различным осям симметрии, т.е. для деки – по трем направлениям: вдоль волокон  $E_a$ ; в радиальном  $E_r$ ; в тангенциальном  $E_t$ .

Поскольку масса тела  $m$  пропорциональна ее плотности  $\rho$ , а между модулями упругости в этих направлениях существует определенная зависимость, т.е. с увеличением  $E_a$  пропорционально увеличиваются  $E_r$  и  $E_t$ , при этом  $E_a$  значительно превышает значения последних двух, то выражение (6.4) можно представить в виде  $\sqrt{\frac{E_a}{\rho^3}}$ .

Последнее выражение характеризует звукоизлучающую способность древесины исходя из соотношения ее модуля упругости и плотности. Причем важно иметь в виду, что дека в музыкальном инструменте работает в динамическом режиме, поэтому модуль упругости следует учитывать соответственно в динамике, т.е.  $E_{a \text{ дин}}$ , что, в отличие от статистических характеристик, свойственно вибрационным системам в области звуковых или ультразвуковых частот.

Выраженная зависимость между упругостью и плотностью материала называется *акустической константой* акад. Н.Н. Андреева,  $\text{м}^4/(\text{кг}\cdot\text{с})$

$$K = \sqrt{\frac{E_{\text{дин}}}{\rho^3}}, \quad (6.5)$$

где  $E_{\text{дин}}$  – динамический модуль упругости вдоль волокон,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  
 $\rho$  – плотность древесины,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Для примера: наибольшую величину акустической константы имеет древесина ели, пихты кавказской и сосны сибирской (кедра) – 12–16  $\text{м}^4/(\text{кг}\cdot\text{с})$ .

Акустическая константа, хотя и характеризует качество материала, обеспечивающего наибольшее излучение звука, но не является единственным объективным параметром для отбора резонансного сырья. Этот показатель чаще применяется как первичный акустический критерий, характеризующий пригодность древесины для изготовления деки того или иного музыкального инструмента.

Поскольку древесина в зависимости от особенностей на уровне макро-, микро- и субмикростроения представляет собой упруго-вязкий (а

при определенных температурно-влажностных условиях и пластичный) материал, то качество деки определяется не только упругими свойствами, но и вязкостью. В данном случае вязкость характеризуется способностью материала поглощать энергию от струн. Реальные тела не являются совершенно упругими, при распространении в них напряжений часть энергии превращается в тепло. Различные процессы этих превращений объединяются общим названием – *внутреннее трение*.

Величина потери энергии при колебаниях на внутреннее трение (вредные потери) определяется через его коэффициент

$$\eta = \frac{\Delta W}{2W}, \quad (6.6)$$

где  $\Delta W$  – потери энергии за период, Дж;

$W$  – энергия колебательного движения, Дж.

С учетом вязкости, или внутреннего трения, более достоверным показателем величины акустической константы является

$$K = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}. \quad (6.7)$$

Иными словами, в результате потери энергии на внутреннее трение происходит затухание амплитуды колебаний деки после прекращения действия источника колебаний.

Объективным показателем, характеризующим скорость затухания колебаний при этом является *логарифмический декремент колебаний* (затуханий)  $\delta$ , Нп (Непер – отношение двух физических величин, натуральный логарифм которых равен единице), который представляет собой натуральный логарифм двух амплитуд, отдаленных друг от друга интервалом в один период:

$$\delta = \ln \frac{A_1}{A_2}, \quad (6.8)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды колебаний в интервале двух соседних периодов.

Логарифмический декремент колебаний связан с коэффициентом внутреннего трения:

$$\delta = \pi\eta. \quad (6.9)$$

Значение  $\delta$  зависит от многих факторов: направления действия возникающих при колебаниях напряжений (вдоль или поперек волокон), породы древесины, ее влажностно-температурных параметров, макро- и микроструктуры и т.д.

Например, при распространении колебаний поперек волокон скорость затухания их увеличивается примерно в четыре раза, по сравнению с распространением колебаний вдоль волокон.

Минимальное значение  $\delta$  у древесины большинства пород наблюдается при 6–8% влажности; при снижении ее до абсолютно сухого состояния и при повышении влажности до предела насыщения клеточных стенок происходит возрастание декремента. Дальнейшее увлажнение древесины не оказывает существенного влияния на него.

Для практических целей в отборе резонансной древесины широко используются также и другие, сравнительно легко определяемые показатели, включая породу, макростроение и ряд размерно-качественных параметров лесоматериалов в круглом или пиленом виде.

Лучшей породой в этом смысле считается во всем мире ель, хотя стандарты на резонансный лесоматериал допускают использование пихты кавказской и кедра.

## **6.2. Строение, свойства и качество резонансной древесины**

### **6.2.1. Макростроение древесины**

Показатели макростроения (ширина годичных колец, равнослойность, содержание поздней древесины) остаются пока основным диагностическим признаком качества резонансного сырья, утвержденным соответствующими стандартами многих стран. Как правило, за небольшими исключениями, официально признается в этих целях древесина мелко-слойная с шириной годичных колец 1–4 мм.

Для мастеров по изготовлению музыкальных инструментов такой показатель макроструктуры древесины давно не является общепризнанным. Например, старые немецкие скрипичные мастера применяли обычно очень узкослойную древесину, а братья Амати, как и Андреа Гварнери, отбирали довольно широко-слойную.

В научных исследованиях разных авторов стали появляться противоречивые выводы о взаимосвязи между макроструктурными и акустическими показателями резонансной древесины.

Профессор В.И. Федюков провел исследования по определению макроструктуры древесины и акустических констант. Результаты исследования показали, что практически отсутствует достоверная связь между шириной годичного слоя и акустическими константами – как в поперечном, так и продольном направлениях.

Содержание поздней древесины  $\leq 55\%$  оказывает более значимое влияние на резонансные свойства, особенно на радиальную и тангенциальную акустические константы, хотя и эти связи выражены слабо. Тем не менее, в принципе, и для акустических свойств подтверждается известное положение о том, что связь между шириной годичного слоя и наиболее важными физико-механическими показателями древесины довольно слабая; гораздо более надежным показателем ее является содержание поздней древесины.

Подтверждается также закономерность проявления резонансных свойств в обратной зависимости от процентного содержания поздней древесины (все акустические константы имеют отрицательную корреляцию с этим показателем).

**Вывод.** При диагностике резонансного материала недостаточно ограничиться только указанными параметрами его макроструктуры.

Весьма значимую информацию об акустических характеристиках древесины имеет характер перехода ранней древесины к поздней, поэтому целесообразно дифференцированное определение в годичных слоях ширины ранней, переходной и поздней зон.

### 6.2.2. Микростроение древесины

Данных, касающихся микростроения резонансной древесины, сопряженности ее звукоизлучающих свойств с физико-механическими показателями, мало. Ранее считалось, что резонансные свойства древесины хвойных пород создаются за счет довольно простого и упорядоченного анатомического строения. Основная часть объема такой древесины представлена трахеидами — сильно вытянутыми волокнами с одревесневшими стенками, которым ошибочно приписывалась роль вытянутых струн, резонирующих звуки от действия музыкального инструмента.

Некоторые исследователи приписывали большую акустическую роль в древесине сердцевинным лучам, которых у ели бывает более 4 тыс. шт./см<sup>2</sup>. Большое количество данного анатомического элемента и считалось благоприятным признаком резонансной древесины.

И.И.Кузнецов предполагал, что у ели из различных районов произрастания длина волокна, толщина стенок трахеид, количество и развитие сердцевинных лучей окажутся варьирующими, соответственно обнаружится различие в акустических свойствах.

Он же отмечает, что непригодность для изготовления деки древесины других пород, хотя и имеющих высокую упругость (например, березы, бука и т.д.), связана с отсутствием у них ясно выраженных годичных колец, как есть у ели.

Одной из основательных работ, выполненных отечественными учеными, являются исследования микроскопического строения резонансной древесины ели европейской из лесов Чувашии. Н.В. Атуриной были установлены следующие *отличительные признаки* резонансной древесины ели высокого качества:

1) модуль упругости и плотность древесины не зависят от процентного содержания площадей сечения полостей и стенок трахеид;

2) минимальный модуль упругости (при данной средней плотности древесины) связан с низким содержанием лигнина и клеточных стенок и, следовательно, с меньшим их одревеснением;

3) минимальное содержание лигнина наблюдается в образцах с большим количеством окаймленных пор на радиальных стенках трахеид;

4) толщина клеточных стенок поздних трахеид примерно в два раза превышает толщину соответствующих стенок ранних трахеид.

Важен сделанный автором вывод о том, что *распознавать резонансную древесину можно только путем сочетания микроскопических и макроскопических методов диагностики.*

Н.И.Лайранд и А.А.Яценко-Хмелевский изучали роль поздней зоны в формировании резонансных свойств у ели обыкновенной, произрастающей в лесах Карелии. Авторами установлено, что акустические качества древесины ели выше в том случае, когда удельный объем плотной массы поздней зоны превышает объем полостей поздних трахеид.

В числе важных современных работ в области анатомии резонансного материала – исследования, выполненные Л.А. Арганашвили на примере ели восточной и пихты кавказской. Основные выводы работы:

1) динамика колебания ширины годичного слоя (у ели восточной 0,5–4,5 мм; пихты кавказской 0,5–5,0 мм) вызывает изменения только плотности и модуля упругости; само соотношение этих параметров не оказывает заметного влияния на величину акустической константы;

2) содержание поздней древесины оказывает большое влияние, в первую очередь, на плотность и модуль упругости данного материала, но когда ее доля превышает 35% в структуре годичного кольца, то значение акустической константы резко снижается.

Современные представления зарубежных ученых о резонансной древесине в зависимости от ее анатомического строения в первую очередь сводятся к решающей роли *взаимопроницаемости систем клеток*, расположенных вдоль и поперек оси ствола, т. е. трахеид и сердцевинных лучей. С этих позиций рассматриваются трахеиды – их величина, плотность и толщина мембран, пор, положение мицелл в стенках клеток, соотношение долей ранних и поздних трахеид, способность образования лигнина, степень очищенности от смол и других органических веществ.

Основой новой теории качества резонансной древесины является известная закономерность, что звукопроводность хотя и остается важным свойством, однако решающим для данного материала являются *внутреннее трение*, которое должно быть малым (чтобы не препятствовать распространению звука), а также *скорость затухания колебаний*, которая, наоборот, должна быть большой (чтобы тон быстро затухал и его мог сменить новый тон, возникающий на струне). Благодаря такому сочетанию поддерживаются чистота, и тембр звука.

Внутреннее трение и затухание колебаний у древесины обусловлены множеством мелких, микроскопических и субмикроскопических полостей и отверстий, заполненных воздухом. Они не повышают трения, но поддерживают затухание колебаний. Следовательно, кроме общетехнических требований к резонансной древесине (соотношение высокого модуля упругости и малой плотности) необходимо наличие определенного объема пустых отверстий в древесине для обеспечения малого внутреннего трения и высокого затухания колебаний.

Профессор В.И. Федюков, исследовав микроструктуру образцов ели, сделал заключение, что высококачественная резонансная древесина ели отличается следующими показателями:

1) переход ранней древесины в позднюю – резкий; при наличии «переходной зоны» ее ширина не более 8–10% ширины ранней зоны годовичного кольца (подразумевается, что «переходная зона» – часть ранней);

2) тонкостенные 4–6-угольные в поперечном сечении ранние трахеиды с толщиной оболочек в 2,0–3,2 мкм, расположенные ровными правильными рядами, т. е. радиальными популяциями;

3) равномерно уменьшающийся радиальный размер трахеид в радиальной популяции;

4) длинные ровные ранние трахеиды (в среднем 3,2–3,5 мм) с равномерно расположенными на их радиальных стенках окаймленными порами в 1–2 ряда;

5) длинные ровные поздние трахеиды (в среднем 3,5–4,5 мм) стенки которых лишены пор.

Установлено также, что между качеством резонансной древесины и линейным размером радиальных лучей (однорядных и веретеновидных) имеется прямая положительная связь. А вот количество лучей на единицу площади и их общий объем заметного влияния на акустические показатели не оказывают.

Абсолютное значение ширины годовичных колец оказывает лишь незначительное влияние на акустические параметры древесины ели. Более существенная роль здесь принадлежит удельному распределению поздних трахеид. Высокие резонансные свойства лесоматериала достигаются, как правило, если содержание поздних трахеид в годовичных слоях древесины не будет превышать 20%.

### **6.3. Изменчивость резонансных свойств древесины внутри ствола дерева**

Деки для музыкальных инструментов вырабатываются из пиломатериалов строго радиальной распиловки и, как правило, в этих целях древесина отбирается на определенном участке по радиусу ствола. В связи с этим возникает необходимость, особенно для изготовления высококачественных (заказных) инструментов, найти наилучшую зону ствола дерева относительно сторон света.

Вторая технологическая особенность изготовления деки – ее короткомерность; длина заготовок для этой детали у большинства музыкальных инструментов колеблется в небольших пределах. Поскольку физико-механические свойства древесины сильно отличаются по высоте ствола, приходится искать лучшую часть дерева и в этом направлении.

Поэтому, для производства музыкальных инструментов представляют немаловажный практический интерес исследования изменчивости резонансных свойств древесины внутри ствола как относительно сторон света, так и по высоте дерева

**Влияние сторон света на дендрометрические параметры ствола.** В лесоматериалах не только общего, но и специального назначения, включая заготовки и детали для *массового изготовления музыкальных инструментов*, обычно не придается практического значения свойствам древесины в зависимости от ее нахождения относительно сторон света. Принято считать, например, что на содержание поздней древесины стороны света не оказывают влияния, а эксцентричность ствола вызывается преимущественно действием других факторов: неравномерным развитием кроны, действием ветра и т.д.

Между тем еще в давние времена мастера по изготовлению скрипок и других инструментов в единичных (заказных) экземплярах придавали отбору материала в стволе особое значение. Причем многие предпочитали древесину с северной стороны, а в «южной» видели «лучшую дровяную», хотя некоторые мастера были за древесину, взятую с южной стороны ствола.

Специальных научных исследований, касающихся дендроакустических различий древесины в зависимости от сторон света, практически нет. Однако имеются данные об особенностях анатомического строения и макроструктуры по секторам ствола, чем косвенно подтверждается необходимость целенаправленного изучения в этом аспекте древесины ели, кедра и пихты кавказской.

На данном уровне исследования можно сделать заключение, что нет общего правила или критерия об использовании древесины в зависимости от ее расположения в стволе; но некоторые деревья в определенных условиях произрастания могут иметь на северной стороне лучшую резонансную древесину, по сравнению с другими сторонами.

Существуют мнения ученых и практиков о том, что верхняя часть ствола по сравнению с нижней имеет большую гибкость – и древесина здесь отличается лучшими резонансными свойствами. Раньше, когда были возможности отбирать достаточно толстые деревья ели, мастера-индивидуалы брали древесину, как правило, на расстоянии не менее 4–6 м от комля.

## **6.4. Диагностика резонансной древесины**

### **6.4.1. Косвенные способы диагностики**

Косвенные способы основаны на прогнозировании запасов резонансного материала по визуальной оценке дерева на корню, почвенно-климатическим или географическим условиям его местопроизрастания.

**Общий вид и состояние дерева.** Среди мастеров существует точка зрения, что отбираемое для изготовления музыкальных инструментов дерево ели должно отвечать следующим основным требованиям:

- 1) абсолютно вертикальный ствол;
- 2) симметричная, узкая и островершинная крона;
- 3) ствол с цилиндрической поверхностью и бессучковой зоной не менее 5–6 метров;
- 4) в бессучковой зоне не должно быть видны пороки и повреждения.

Котируются более толстые стволы: при диаметре менее 35 см на уровне груди, т.е. при возрасте дерева менее 100–120 лет, считается нецелесообразным использование дерева как источника резонансного материала. Такие требования к резонансному дереву продиктованы прежде всего технологическими и экономическими соображениями, включая максимальный выход делового сортимента, допустимые параметры деки для того или иного музыкального инструмента.

Что же касается возможности связей между акустическими характеристиками древесины и указанными параметрами дерева, то специальных исследований в этом направлении пока нет.

Румынский ученый В. Грапини приводит более подробные данные для резонансной ели: крона в виде колонны, почти симметричная и постепенно убывает от основы к вершине под углом 30°–40°, образована из тонких ветвей, ориентированных в большинстве вниз; ветви из третьей части середины и низа кроны приросли в ствол под углом 30°–40°; крупные сучья располагаются мутовками, кроме того есть еще и ветви вне мутовок; ветви второго порядка сравнительно редкие, тонкие, длинные, свисающие, пепельно-зеленого цвета; ветви третьего порядка также редкие, тонкие, но светло-зеленого цвета; хвоинки расходятся, равномерно распределяясь на ветви, но не нагромождены на вершине.

Многие мастера – индивидуалы также считают, что нисходящие ветви являются признаком резонансной ели.

**Структура и цвет коры.** Эти морфологические признаки деревьев ели чаще всего используются мастерами при отборе материала для изготовления музыкальных инструментов, причем в одинаковой степени как на корню, так и в круглых сортиментах. Однако и здесь нет единого мнения о каком-либо характерном признаке, принятом в качестве диагностического.

Например, по мнению ряда французских мастеров, кора у резонансной ели должна быть серого цвета и состоять из достаточно малых и гладких чешуй.

Румынские специалисты считают, что еловые деревья с округлыми, вогнутыми чешуями – с большой вероятностью резонансные. Н.А.

Санкин считает, что следует отдавать предпочтение ели чешуекорой формы, как обладающей большей генетической пластичностью.

**Внешний вид древесины.** Это понятие включает следующие основные показатели: макроструктуру; цвет, характеризующийся, в свою очередь, такими параметрами, как цветовой тон, светлота и чистота, блеск, текстура.

Макроструктура как диагностический признак древесины широко учитывается при визуальной оценке многих физико-механических и эксплуатационных характеристик, включая и резонансные. Такие показатели макроструктуры, как ширина и равнослойность годовичных колец, содержание в них поздней древесины, включены в стандарты разных стран в качестве основного критерия при отборе резонансного сырья. Считается, что более узкослойная древесина придает инструменту жесткий, металлический звук, а широкослойная – приглушенный. Особые требования предъявляются к равнослойности годовичных колец.

Однако встречаются смычковые инструменты, в том числе скрипки (и даже у знаменитых представителей староитальянских школ), где верхние деки сделаны из более широкослойной древесины, чем того требуют нынешние стандарты. Следовательно, за счет варьирования конструкции инструмента в соответствии с «характером» материала эти мастера могли добиться выдающихся результатов независимо от этого параметра макроструктуры (или в качестве критерия «музыкальности» древесины выбирали другие признаки и держали их в секрете).

Например, особое место в выдающихся произведениях мастеров кременской школы занимает разновидность ели *Haselfichte*, со свилеватой древесиной; ель эта никогда не растет большими группами, а обнаруживается в виде одиночных деревьев в чешских и баварских лесах, в Альпах.

Как отмечает Н.С.Нестеров, российские мастера по особенностям макроструктуры на радиальном разрезе различали три сорта резонансной древесины ели: струистую, пламенистую, краснослойную.

*Струистая* древесина в пределах прямых годовичных слоев имеет слегка волнообразный сдвиг древесных волокон. Она отличается эластичностью, дает чистые тона и является наиболее ценной для изготовления деки, особенно смычковых инструментов.

*Пламенистая* по текстуре напоминает язычки пламени и отличается красивым узорчатым видом, схожим с древесиной клена. Такая древесина хотя и уступает струистой, но тем не менее находит применение в инструментальном деле. Такой материал особо ценится в столярном производстве.

В *краснослойной* древесине зона поздней части годовичного кольца резко отличается своим красным цветом от бледно-желтой ранней части. Плотность такой древесины на 15–20% выше обычной. Ценится она сравнительно ниже, чем вышеназванные сорта.

**Цвет** древесины характеризуется словесными описаниями, а в древесиноведческой науке при более строгом подходе – колориметрическими показателями, определяемыми с помощью фотоэлектрических приборов или атласов цветов: цветовым тоном  $\lambda$ , чистотой  $P$  и светлотой  $\rho$ .

При целевом отборе материала для изготовления музыкальных инструментов характеристики цвета используются в первую очередь в эстетических целях, а также для визуальной оценки качества и состояния древесины; как правило, бракуется древесина с такими пороками, как синева, водослой, крень, что нетрудно определить по соответствующему зрительному образу.

Что же касается древесины для изготовления основной звукоизлучающей детали – деки, то многие мастера пригодность оценивают и по зрительному ощущению отражаемого данным материалом цветового потока, т. е. субъективным определением цвета. Однако нет единого мнения о цвете древесины как о визуальном диагностическом признаке акустических свойств: одни мастера предпочитают для деки древесину ели более светлых, белых, а другие – желтых тонов.

Даже официальные стандарты предъявляют разные требования к цвету резонансного материала. Например, ТУ 205 РФ08.866-89 (взамен ГОСТ 6900-83) допускают «желтый приемлемый» цвет древесины ели, а стандарт Польши PN-63 095071 для этой же породы и для пихты – белый. Возможно, это связано с принадлежностью деревьев к той или иной генетической форме.

Может быть, такие противоречивые взгляды вызваны и тем обстоятельством, что нет пока объективных научных подтверждений в пользу того или иного цвета резонансной древесины.

**Блеск** древесины как ее способность направленно отражать световой поток издавна используется мастерами инструментального дела для распознавания качественного материала. Например, считается, что древесина ели нашего русского северного типа, имеющая нежный и шелковистый блеск и в то же время ярко выраженные тонкие слои, придает тембру звука нежность, серебристость и приятную завуалированность, а древесина с более грубым блеском, особенно в указанном *Ha-selfichte*, – силу, интенсивность, но вместе с этим (при недостаточно тщательной обработке деки) – грубость. Оба эти типа древесины встречаются в инструментах итальянских мастеров.

Немецкие мастера предпочитают ель с резкими и крупными блестками, называемую ими *Spiegel*, т. е. зеркало.

Кроме акустического эффекта, блеск, наряду с цветом и текстурой, играет в инструментах и чисто эстетическую роль, поэтому мастер при отборе материала, безусловно, обращает внимание и на эту сторону.

**Текстура, или рисунок** на поверхности древесины, наравне с макроструктурой является диагностическим признаком для визуального

отбора резонансного лесоматериала. Кроме того, по текстуре сравнительно легко можно определить наличие и соответствующие характеристики такого порока древесины, как наклон волокон, что является одним из основных параметров в оценке пригодности материала для изготовления деки практически всех видов музыкальных инструментов.

Тем не менее, основная роль текстуры заключается в том, что она предопределяет декоративную ценность древесного материала. Это свойство древесины приобретает особую значимость в целевом выращивании и отборе клена с оригинальной текстурой для изготовления нижней деки щипковых, смычковых и других музыкальных инструментов.

**Запах.** Некоторые мастера при наборе дек для инструмента в качестве диагностического признака используют запах древесины. По всей видимости, таким путем они определяют прежде всего смолистость материала, т. к. смолистые вещества, как известно, отрицательно влияют на акустические показатели древесины. Следовательно, более «душистая» древесина мастерами бракуется.

**Упругость.** Косвенным можно считать способ, которым раньше довольно часто пользовались мастера при определении упругости древесины. Принцип этого способа прост и заключается в том, что из отобранного материала изготавливается небольшой брусочек, который одним концом приклеивается к доске; а другой конец (торцовый) натирается шерстяной тряпкой, покрытой канифолью. Чем выше тон, производимый испытуемым образцом, тем выше считается упругость древесины. При всем удобстве и простоте данный способ не лишен недостатков. Здесь не исключается субъективный подход, ибо на результатах такой диагностики древесины, несомненно, сказываются опыт и уровень развития слуха мастера.

#### 6.4.2. Прямые способы диагностики

Прямые способы диагностики и отбора резонансного материала для изготовления деки музыкальных инструментов основаны на измерениях его плотности, жесткости (модуля упругости), скорости звука, затухания и амплитуды колебаний, величины потери энергии на внутреннее трение. Располагая результатами этих измерений, можно расчетным путем определить основные акустические и упруго-вязкие характеристики древесины и выявить ее пригодность как резонансного материала по соответствующим сопоставлениям с установленными стандартными критериями.

Для определения вышеназванных параметров разработаны различные методики и оборудование.

Методов измерения модуля упругости, скорости звука в древесине, затухания и амплитуды колебания, величины потери энергии на внутреннее трение, то есть параметров в комплексе характеризующих аку-

стические и упруго-вязкие свойства резонансного материала, – много, и существуют они в различных вариантах.

Тем не менее, такое многообразие существующих методов можно объединить в наиболее крупные, характерные направления. Например, для определения скорости звука в древесине наибольшее распространение получили два принципиально разных подхода с соответствующими приборами и установками.

В первом случае скорость распространения звука в древесине устанавливается путем определения резонансной частоты вынужденных продольных колебаний образца согласно уравнению:

$$C = 2f_0 l, \quad (6.10)$$

где  $C$  – скорость распространения звука, м/с;

$f_0$  – резонансная частота, Гц;

$l$  – длина образца, м.

Наиболее простым и доступным способом определения этого показателя является импульсный ультразвуковой:

$$C = \frac{l}{\tau}, \quad (6.11)$$

где  $\tau$  – время распространения упругой продольной волны, с.

Зная скорость звука в данном материале и его плотность, определяют динамический модуль Юнга  $E$ , Н/м<sup>2</sup>:

$$C = \sqrt{\frac{E_{дин}}{\rho}}, \quad E_{дин} = C^2 \rho. \quad (6.12)$$

Небольшие преобразования и совместные решения уравнений позволяют определить величину акустической константы  $K$  через  $C$  и  $\rho$ :

$$\begin{cases} K = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \\ C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \end{cases}, \quad K = \frac{C}{\rho}. \quad (6.13)$$

Ультразвуковые приборы нашли широкое применение при отборе резонансной древесины в заготовках, т. е. непосредственно при изготовлении музыкальных инструментов.

Известно, что некоторые мастера отбирали необходимый материал по акустическому отклику путем ударов по стволу. Способ этот называется вьтон-проба и применяется также и для выявления внутренних пороков, стволовых вредителей и вообще санитарного состояния деревьев на корню.

**Контрольные вопросы:** 1. Что такое резонансная древесина? Правильно ли применяется этот термин для древесины, идущей на из-

готовление музыкальных инструментов? 2. Какими физико-механическими параметрами должна обладать резонансная древесина? 3. Каким макростроением должна обладать резонансная древесина? 4. Каким микростроением должна обладать резонансная древесина? 5. Как изменяются резонансные свойства древесины внутри ствола? 6. Какие косвенные способы диагностики резонансной древесины существуют? 7. Какие прямые способы диагностики резонансной древесины существуют?

## Глава 7. Анизотропия древесины

### 7.1. Оптимизация опорных конструкций живых систем в процессе эволюции

Уровень технического развития общества в значительной мере зависит от тех материалов, которыми оно располагает. Материалы определяют возможность изготовления машин и конструкций, необходимых для решения новых задач техники, материалы определяют технологию изготовления этих изделий.

Конструкционными называют материалы, пригодные для изготовления машин и конструкций, а следовательно, обладающие достаточными механическими свойствами. Укрепление материалов прочными волокнами (армирование) позволяет создавать материалы принципиально новые, оптимальные по механической сопротивляемости.

В армированных материалах один из компонентов (армирующий) обладает значительно более высокой прочностью и жесткостью, чем другой (связующий). Так, для ракетостроения создаются материалы, в которых армирующими являются тонкие волокна (стекла, углерода, бора, сапфира; или волокнами этими являются металлические монокристаллические «усы»), а в качестве связующего (матрицы) используются полимеры или пластичные металлы. Большое распространение в технике получили высокопрочные стеклопластики.

Главная цель изучения свойств природного армированного материала – древесины состоит в том, чтобы помочь ее рациональному использованию с учетом анизотропии, которая должна быть оптимизирована в изделиях, подобно тому как это эволюционно совершилось в механических тканях опорных элементов живых систем.

Законы развития природы имеют некоторые общие черты с законами технического прогресса. Общие черты проявляются, в частности, в том, что биологическая эволюция живых систем сопровождается оптимизацией «инженерных» устройств, благодаря которым система сопротивляется внешним воздействиям. При этом оптимизируются форма (геометрия) системы и материал ее опорных конструкций.

Анизотропию древесины можно рассматривать как следствие эволюционной оптимизации опорной конструкции живой системы – древесного ствола, которая происходила в процессе длительного биологического развития. Биологическая эволюция, позволяющая живым системам усовершенствовать строение, приспособляясь к внешним условиям, связана с естественным отбором. В процессе естественного отбора происходит, в сущности, сопоставление признаков, возникающих в результате внутренней случайной изменчивости и информации, поступающей из внешней среды. Таким образом, под влиянием внешней среды формируется симметрия живых систем и их упорядоченная структура.

Простейшие организмы, плававшие во взвешенном состоянии в однородной среде, имели внешнюю форму, подчиняющуюся шаровой симметрии среды и ее воздействиям. Этот вид симметрии обеспечивался равенством скоростей роста в разных направлениях. Воздействию гидростатического давления при относительно малом влиянии земного тяготения лучше всего сопротивлялись организмы шаровой формы.

Постепенно в процессе развития жизни создались условия для выхода организмов (в первую очередь – растений) из океана на сушу. Возник другой вид симметрии, зависящий от симметрии поля земного тяготения. Растения, прикрепленные к земной поверхности, испытывали воздействие силы тяжести. Скорости их роста по вертикали и по горизонтали оказались различными, но по всем горизонтальным направлениям – одинаковыми. Такая симметрия свойственна геометрическим фигурам кругового цилиндра и конуса, ось которых совмещена с одним из диаметров земного шара (с направлением силы тяжести).

Этот вид симметрии, если не обращать внимания на случайные индивидуальные отклонения, характерен для внешней формы свободно и правильно растущего дерева. Строение древесины в стволе тоже в целом подчиняется такому виду симметрии.

Более сложную форму симметрии имеет все, что растет наклонно или по горизонтали, а также, что движется по земле, в воде, по воздуху или испытывает постоянные по направлению горизонтальные нагрузки. Появляется плоскость симметрии, которая делит тело на две зеркально-равные половины. Такова симметрия листьев и веток, для которых силы тяжести лежат в вертикальной плоскости. Такова и симметрия ствола деревьев, для которых определяющим является сопротивление сильным и постоянным по направлению ветровым нагрузкам. Сечение ствола в этом случае имеет форму не круга, а эллипса, большая ось которого совпадает с направлением ветра.

Дифференциация строения организмов обусловила появление различных тканей. Механические ткани обеспечивают сохранение внешней формы и сопротивление механическим нагрузкам, к которым относятся масса тела и внешние воздействия. Механические ткани часто выполняют одновременно и другие функции, например, в составе ствола дерева – проводящие и запасающие. Все механические ткани отличаются сложной внутренней структурой и у растений и у животных, как правило, имеют слоистое и волокнистое строение.

Оптимизированы по условию наилучшего сопротивления внешним нагрузкам не только структура механических тканей, но и напряжения, возникающие в процессе роста тканей. В древесине растущего дерева обнаружена система внутренних (начальных) напряжений, возникающих в процессе роста и повышающих сопротивление опорной системы внешним нагрузкам.

Ствол дерева можно рассматривать как сложную, предварительно напряженную армированную и слоистую пространственную конструкцию, равнопрочную во всех своих частях и способную к значительным упругим деформациям. Равнопрочность (по высоте) и деформативность ствола обусловлены в первую очередь его сбегом. Строение древесины ствола оптимизировано по отношению к растягивающим и сжимающим напряжениям, возникающим в стволе растущего дерева и действующим вдоль его оси. Древесные волокна ориентированы по траекториям действия главных напряжений. Слоистое строение древесины, при котором более податливые прослойки ранней древесины правильно чередуются со слоями более жесткой, поздней древесины, способствует увеличению прогибов ствола под действием ветровой нагрузки. Дополнительный прогиб получается за счет сдвигов по слабым слоям ранней древесины при действии на ствол поперечной силы (при этом с увеличением влажности древесины влияние сдвигов будет расти). Увеличение прогиба приводит к уменьшению изгибающего момента от ветровой нагрузки.

Строение ствола – с более прочными наружными слоями и менее прочной сердцевиной обеспечивает хорошую сопротивляемость действию силы тяжести и увеличивает его устойчивость при вертикальных нагрузках, вызванных массой кроны. В корнях дерева, работающих главным образом на растяжение, более прочный материал расположен по центральной оси, что соответствует механической функции корней в качестве тяжей, удерживающих ствол дерева в вертикальном положении. Поэтому и прочность древесины корней на растяжение значительно выше, чем на сжатие (для некоторых пород почти в 20 раз).

Впервые вопросы архитектоники древесного ствола рассматривал Галилей (XVII в.), который писал, что природа смогла создать деревья большой высоты, лишь применив для этого особо прочный материал. Основываясь на теории Дарвина, описывал законы и приспособительное значение механической прочности растений Г. Спенсер в середине XIX в. В 1874 г. С. Шведенер предложил первую расчетную схему для объяснения формы ствола, учитывая только его изгиб сосредоточенной силой (давлением ветра на крону). Наиболее обстоятельная механическая теория формы древесного ствола принадлежит финскому ученому А. Юлинену, который предварительно экспериментально исследовал в аэродинамической трубе сопротивление древесных крон различной формы – действию ветра. Для трех пород древесины Юлинен экспериментально обнаружил на растущих деревьях линейное уменьшение модуля от комля к вершине (для березы в 1,5 раза, а для хвойных – вдвое), особенно значительное в верхней части ствола.

В нормально растущем дереве при отсутствии внешних нагрузок периферийная зона ствола испытывает напряжения растяжения вдоль волокон и сжатия поперек волокон. В центральной части ствола вдоль волокон действуют сжимающие, а поперек волокон – растягивающие на-

пряжения. Распределение напряжений роста в прямых, вертикально растущих деревьях симметрично относительно оси ствола.

Известно, что прочность древесины при сжатии вдоль волокон ниже, чем при растяжении (для березы более чем втрое). При изгибе ствола горизонтальными силами ветра сжимающие и растягивающие напряжения в наружных волокнах одинаковы по абсолютной величине. Дополнительные напряжения от действия на ствол массы кроны везде сжимающие. Поэтому сжимающие напряжения в стволе могут достичь опасной величины раньше, чем растягивающие. Начальные растягивающие напряжения, складываясь со сжимающими напряжениями от внешних нагрузок, уменьшают максимальную величину этих нагрузок. Такое уменьшение сжимающих и увеличение растягивающих напряжений приводит к тому, что соотношение суммарных напряжений сжатия и растяжения, действующих в наружных волокнах ствола, приближается к соотношению между их предельными величинами, характеризующими прочность при сжатии и при растяжении. Тем самым уменьшается опасность преждевременного появления складки разрушения в сжатой зоне ствола и связанных с ней остаточных (необратимых) деформаций. Система начальных напряжений (напряжений роста) обеспечивает равнопрочность ствола по его сечению. Конструкция ствола работает при этом как предварительно напряженная.

Изменчивость плотности древесины по радиусу и по высоте ствола подчиняется законам оптимизации сопротивления растущего дерева внешним нагрузкам при изгибе и сжатии. Увеличение плотности по радиусу ствола от сердцевины к коре характерно для комлевой части древесины ствола большинства пород. При изгибе дерева силой ветра именно в комлевой части возникают наибольшие напряжения, возрастающие от сердцевины к коре.

Высокие значения плотности, связанные с высоким процентным содержанием поздней древесины, обеспечивают большую прочность наиболее нагруженной – наружной зоны комлевой части ствола. Увеличение плотности от вершины к комлю особенно сильно проявляется у таких пород, как сосна и береза, для которых характерна высоко поднятая крона, воспринимающая ветровую нагрузку (плотность древесины сосны увеличивается от вершины к комлю почти на 30%). У ели и осины живая крона опускается значительно ниже, давление ветра распределяется почти по всей высоте дерева, а величины изгибающих моментов от действия ветра имеют поэтому меньшие значения, чем у сосны или березы; плотность древесины ели и осины сравнительно мало меняется по высоте ствола, несколько увеличиваясь к наружной части ствола только в комле.

Важнейшим следствием эволюционной оптимизации механической ткани, обеспечивающей сопротивление растущего дерева воздействиям внешней среды, является ориентированность макро- и микроструктуры.

## 7.2. Анизотропия древесины как следствие ее макро- и микростроения

Характерной особенностью древесины всех пород и многих древесных материалов является **анизотропия**. Слово «анизотропия» (гр. *anisos* неравный, неодинаковый + *tropoi* образ действия, поведение) означает неодинаковость свойств материала в различных структурных направлениях. Анизотропия всегда является следствием упорядоченности в расположении структурных элементов и в их ориентации.

Анизотропия древесины является следствием ее макроструктуры (анатомического строения) и микростроения составляющих ее клеточных оболочек. Срубленная древесина, рассматриваемая в техническом древесиноведении как конструкционный материал, состоит из одних клеточных оболочек. Основным веществом, из которого состоит слоистая клеточная оболочка (стенка), является целлюлоза. Элементарная фибрилла (лат. *fibra* волокно) представляет собой пучок макромолекул целлюлозы и имеет в значительной своей части кристаллическую структуру вследствие регулярного расположения молекул. Элементарные фибриллы входят в состав микрофибрилл, в которых кристаллические (ориентированные) области чередуются с неориентированными. В последних нитевидные макромолекулы расположены хаотически.

В клеточной стенке имеются слои, в каждом из которых целлюлозные микрофибриллы ориентированы по-разному. В наиболее мощном – среднем слое вторичной оболочки спирально расположенные микрофибриллы ориентированы под углом  $5^{\circ}$ – $15^{\circ}$  к продольной оси клетки. Прочность клеточных оболочек определяется составляющими их микрофибриллами и аморфным лигнином. Таким образом, уже в самых малых построениях древесного вещества – микрофибриллах и клеточных оболочках имеются элементы ориентации. Вместе с тем изменчивость биологического объекта, каким является клеточная стенка древесины различных пород, не позволяет распространить характер анизотропии, присущий этим построениям, даже на элементарные объемы древесины, рассматриваемой как конструкционный материал. Существенное влияние на анизотропию древесины оказывает ее анатомическое строение – макростроение. При этом основную роль играют механические ткани, придающие прочность растущему дереву.

Расположенная между древесиной и корой тонкая прослойка образовательной ткани (камбий) содержит два типа живых начальных клеток (инициалей), из которых преобладающим является тип инициалей, имеющих сильно вытянутую форму и образующих в дереве анатомические элементы, ориентированные вдоль его оси.

Древесина хвойных и лиственных пород состоит из различного набора анатомических элементов, для которых общей является их упорядоченная волокнистая структура. Механическую (опорную) функцию в древесине хвойных пород выполняют в первую очередь трахеиды, кото-

рые расположены в растущем дереве главным образом вертикально и составляют более 90% объема древесины. Трахеиды имеют форму сильно вытянутых волокон с поперечным сечением правильной формы (у большинства пород – прямоугольной). Слоистое строение древесины определяется различием в размерах трахеид, образуемых в начале вегетационного периода (ранняя древесина), и в его последующей стадии – поздних трахеид, с более толстыми стенками, играющих основную роль в сопротивлении механическим нагрузкам. Строение древесины лиственных пород несколько менее упорядоченно. Механическую функцию выполняют здесь волокна либриформа и волокнистые трахеиды. Волокна либриформа (лат. *libri* лыко) представляют собой клетки, вытянутые вдоль оси ствола, имеющие значительно меньшие размеры, чем поздние трахеиды хвойных пород. Волокнистые трахеиды и волокна либриформа объединяются общим понятием «древесное волокно».

Расположением древесных волокон вдоль оси дерева обуславливается резкое различие механических свойств древесины в направлении поперек и вдоль ствола. Это различие усиливается влиянием ориентации микрофибрилл в клеточных стенках и ориентации части молекул целлюлозы в микрофибриллах.

Таким образом, различие в величине характеристик свойств древесины в направлениях поперек и вдоль волокон обусловлено ее макро- и микростроением. Модули упругости для направления вдоль волокон почти в 40 раз (ель) больше, чем поперек, а предел прочности при сжатии в 10, при растяжении в 20–30 раз. Отношения величины модуля упругости вдоль и поперек волокон для древесины хвойных пород в среднем оказываются более высокими, чем для древесины лиственных. Объясняется это менее упорядоченным строением древесины лиственных пород и относительно большим влиянием сердцевинных лучей на их жесткость в поперечном направлении. Наименьшее различие в упругих свойствах вдоль и поперек волокон имеет древесина дуба – с толстостенными короткими древесными волокнами и большим содержанием сердцевинных лучей. Наибольшее различие обнаруживает древесина ели – с тонкими и длинными трахеидами.

Различие между свойствами древесины для разных ориентаций, лежащих в плоскости поперек волокон, связано главным образом с ее анатомическим строением (макроструктурой). Слоистость, обусловленная чередованием в годичных слоях ранней и поздней древесины, особенно выраженная в хвойных породах, определяет различие в механической прочности древесины в радиальном и тангенциальном направлениях, особенно при сжатии. Наибольшую прочность при сжатии поперек волокон древесина сосны, например, имеет в тангенциальном направлении, если при этом кривизна годичных колец достаточно мала в пределах сжимаемого образца. Поздние трахеиды, у которых размеры в тангенциальном направлении больше, чем в радиальном, а стенки тол-

ще, чем у ранних, определяют при сжатии в тангенциальном направлении механическую прочность древесины. Лиственные породы, в частности береза, обнаруживают при сжатии в тангенциальном направлении меньшую прочность, чем в радиальном, что связано в первую очередь с влиянием сердцевинных лучей, упрочняющих радиальное направление. Этим же влиянием сердцевинных лучей объясняется для лиственных пород меньшая прочность при растяжении в тангенциальном направлении, чем в радиальном. Для хвойных – сосны, лиственницы – прочность на растяжение в радиальном направлении меньше, чем в тангенциальном. При растяжении в радиальном направлении разрушение идет по слабому слою ранней древесины, а в тангенциальном разрыву сопротивляются слои ранние и поздние, причем последние воспринимают большую часть нагрузки. Влияние сердцевинных лучей у хвойных пород не существенно и в этом случае.

Влиянием сердцевинных лучей, особенно у лиственных пород, объясняется различие упругих свойств в различных направлениях поперек волокон: эти своеобразные лучи жесткости повышают сопротивляемость упругому деформированию в радиальном направлении по сравнению с тангенциальным, и различие оказывается тем сильнее, чем больше доля объема сердцевинных лучей в анатомическом строении древесины. Поэтому различие это выражено сильнее: у лиственных пород, чем у хвойных; у дуба, чем у березы.

Ориентированное макро- и микростроение древесины обуславливает ее анизотропию не только при механических, но и при других физических воздействиях.

**Контрольные вопросы:** 1. Какие материалы называют конструктивными? 2. Каковы особенности природного армированного материала – древесины? 3. Что такое анизотропия? Какова эволюционная причина ее возникновения? 4. Как проявляется анизотропия в макростроении древесины? 5. Как проявляется анизотропия в микростроении древесины?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебном пособии рассматриваются физические свойства древесины, способы сушки и пропитки, особенности ствола дерева как конструкционного материала.

Основной акцент сделан на строении древесины, т. к. оно обуславливает особенность свойств по сравнению с искусственными материалами, а также определяет анизотропность древесного материала.

Подробно рассмотрены два основных физических свойства, влияющих на качество древесины, плотность и влажность. Описаны механизмы пропитки древесины при различных условиях консервации. Рассмотрены физические явления, протекающие во время сушки древесины, а также дана характеристика тесно связанных с ней явлений усушки, разбухания и усадки. Даны практические рекомендации по избеганию влажностных деформаций и брака сушки.

Подробно рассмотрен вопрос о резонансной древесине. Описаны косвенные и прямые способы диагностики древесного материала, идущего на изготовления музыкальных инструментов.

Дана история изучения ствола дерева как растительной конструкции. Рассказано о формировании элементов древесины.

В целом материал учебного пособия является систематизацией данных в области физики, механики, древесиноведения, биологии и сопротивления материалов.

## Список использованной литературы

1. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е.К. Ашкенази. – М. : Лесная промышленность, 1978. – 224 с.
2. Ашкенази Е.К. Анизотропия механических свойств древесины и фанеры / Е.К. Ашкенази. – М. : Лесная промышленность, 1978. – 223 с.
3. Ашкенази Е.К. Прочность анизотропных древесных и синтетических материалов. / Е.К. Ашкенази. – М. : Лесная промышленность, 1966. – 167 с.
4. Баженов В.А. Проницаемость древесины жидкостями и ее практическое значение / В.А.Баженов – М. : Изд-во АН СССР, 1952. – 82 с.
5. Боровиков А.М. Справочник по древесине / А.М.Боровиков, Б.Н.Уголев. – М. : Лесная промышленность, 1989. – 296 с.
6. Калниньш А.Я. Консервирование древесины / А.Я.Калниньш. М. : Гослесбумиздат, 1962. – 146 с.
7. Кармадонов А.Н. Дефектоскопия древесины / А.Н.Кармадонов. – М. : Лесная промышленность, 1987. – 115 с.
8. Кречетов И.В. Сушка древесины / И.В.Кречетов. – М. : Лесная промышленность, 1980. – 432 с.
9. Лакатош Б.К. Дефектоскопия древесины / Б.К.Лакатош. – М. : Лесная промышленность, 1966. – 188 с.
10. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – М. : Наука, 1977. – 415 с.
11. Пейч Н.Н. Сушка древесины / Н.Н.Пейч, Б.С.Царев. – М. : Высшая школа, 1975. – 224 с.
12. Полубояринов О.И. Плотность древесины: учебное пособие / О.И.Полубояринов. – Л. :РИО ЛОЛЛТА, 1973. – 77 с.
13. Савков Е.И. Механические свойства древесины / Е.И. Савков. – М. : Лесная промышленность, 1965. – 63 с.
14. Серговский П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины / П.С.Серговский, А.И.Расев. – М. : Лесная промышленность, 1987. – 360 с.
15. Соболев Ю.С. Древесина как конструкционный материал / Ю.С.Соболев. – М. : Лесная промышленность, 1979. – 248 с.
16. Справочное руководство по древесине / М. : Лесная промышленность, 1979. – 544 с.
17. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения / Б.Н.Уголев. – М. : Изд-во МГУЛ, 2004. – 340 с.
18. Федюков В.И. Основы квалиметрии и управления качеством лесоматериалов спецназначения (на примере резонансной древесины с уникальными акустическими свойствами): Учебное пособие / В.И.Федюков. – Йошкар-Ола : Изд-во МарГТУ, 2000. – 184 с.