

При сушке пиломатериалов в сушильных камерах при повышенной температуре интенсивность процесса удаления воды выше. В камерах пиломатериалы можно высушить до более низкой влажности и значительно быстрее. Продолжительность сушки досок толщиной 40 мм от влажности 60 % до 12 % составляет 3–4 сут.

**Усушка.** Уменьшение линейных размеров и объема древесины при удалении из нее связанной воды называется усушкой. Снижение содержания свободной воды не приводит к усушке древесины.

Усушку вызывает удаление адсорбционной воды, находящейся внутри древесинного вещества. Однако одновременно с адсорбционной водой происходит испарение микрокапиллярной воды, поэтому усушка наблюдается при любой температуре сразу же после снижения влажности за предел насыщения клеточных стенок. Вначале удаляется преимущественно микрокапиллярная вода и сравнительно небольшое количество адсорбционной воды. Поэтому на начальном этапе снижения влажности усушка растет сравнительно медленно. После удаления всей микрокапиллярной воды наблюдается значительно более интенсивный рост усушки.

Адсорбционная вода находится главным образом в промежутках между микрофибрillами и частично внутри самих микрофибрill. Поскольку микрофибрillы ориентированы в основном по направлению продольной оси клетки, удаление адсорбционной воды приводит к уменьшению толщины клеточных стенок и поперечных размеров клетки. Учитывая, что анатомические элементы вытянуты преимущественно вдоль оси ствола, наибольшая усушка должна наблюдаться в поперечных направлениях. Действительно, продольная усушка, которая обусловлена некоторым наклоном микрофибрill, в несколько десятков раз меньше, так как составляет лишь долю от основной поперечной деформации. В тангенциальном направлении поперек волокон усушка в 1,5–2 раза больше, чем в радиальном.

Причины анизотропии усушки в плоскости поперек волокон, вытекающие из анализа, приведенного в монографии [64], а также исследований МЛТИ 80-х годов, заключаются в следующем. Величина усушки находится в гиперболической (близкой к линейной) зависимости от плотности древесины: чем больше масса клеточных стенок в единице объема древесины (т. е. чем больше находится в данном объеме древесины адсорбционной воды), тем больше усушка. Следовательно, более плотные поздние зоны годичных слоев древесины должны усыхать больше, чем ранние зоны. Это подтверждается экспериментальными данными [49], пересчитанными согласно современным способам исчисления усушки и представленными в табл. 14.

#### 14. Тангенциальная усушка ранней и поздней зон годичного слоя древесины\*

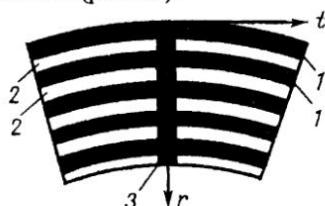
Порода	Усушка, %		Порода	Усушка, %	
	ранней зоны	поздней зоны		ранней зоны	поздней зоны
Лиственница	7,8	9,4	Бук	11,4	11,8
Сосна	6,7	7,5	Береза	8,6	9,3
Ель	6,1	7,4	Тополь	9,4	10,6
Дуб	8,4	9,8	Ива	6,5	6,9

\* Для рассеяноносудистых пород под ранней зоной годичного слоя подразумевается его первая половина, обращенная к сердцевине, а под поздней – вторая половина, обращенная к коре.

Сильно усыхающие поздние зоны стягивают ранние зоны и, в основном, определяют величину усушки всей древесины в тангенциальном направлении. Так, по данным В.П. Галкина (МЛТИ), полученным на микрорезцах заболони сосны, тангенциальная усушка изолированных поздних и ранних зон составила соответственно 9,2 и 5,5 %, а усушка всей древесины в этом направлении была 8,5 %. По радиальному направлению усушка древесины равна средней (точнее – средневзвешенной величине) между усушками ранней и поздней зон. Ясно, что радиальная усушка древесины должна быть значительно меньше тангенциальной (рис. 25).

Рис. 25. Схема взаимного расположения элементов макроструктуры, влияющих на радиальную и тангенциальную усушку древесины поперек волокон:

1, 2 – поздние и ранние зоны годичных слоев; 3 – сердцевинный луч; *t* – тангенциальное направление; *r* – радиальное направление



На анизотропию усушки влияют также сердцевинные лучи (особенно, у лиственных пород). В стенках паренхимных клеток сердцевинных лучей микрофибриллы направлены под сравнительно малым углом к их длине. Поэтому продольная усушка сердцевинных лучей, по крайней мере, в 2 раза меньше поперечной. Сердцевинные лучи сдерживают усушку древесины в радиальном направлении (рис. 25). С увеличением содержания сердцевинных лучей радиальная усушка древесины снижается.

Усушка зависит от особенностей тонкого строения древесины. Отношение тангенциальной усушки к радиальной в ранней зоне годичных слоев составляет у хвойных пород 2–3 (у лиственницы даже 5), в то время как в поздней зоне указанное отношение примерно в 2 раза меньше. Наблюдаются большая поперечная усушка радиальных стенок клеток по сравнению с тангенциальными, различия в усушке отдельных слоев клеточной стенки и т. д.

Однако для практики наибольшее значение имеет анизотропия усушки сравнительно больших объемов древесины. При этом наблюдается обратная связь между анизотропией усушки и упругих свойств (модулей упругости). В направлении наибольшей жесткости, т. е. вдоль волокон, усушка наименьшая. Поперек волокон усушка больше в тангенциальном направлении, в котором жесткость меньше, чем в радиальном.

Показателем усушки является влажностная (несиловая) деформация. Под полной, или максимальной, усушкой  $\beta_{\max}$  понимают уменьшение линейных размеров или объема древесины при удалении всего количества связанной воды. Следовательно, для установления  $\beta_{\max}$  влажность древесины должна быть снижена от предела насыщения клеточных стенок до нуля. Замеренное при этом уменьшение размеров (объема) образца относится к размеру (объему) образца при пределе насыщения клеточных стенок и выражается в процентах.

Формула для вычисления полной усушки, %, имеет вид

$$\beta_{\max} = \frac{100(a_{\max} - a_{\min})}{a_{\max}}, \quad (8)$$

где  $a_{\max}$  – размер (объем) образца при влажности равной или выше предела насыщения клеточных стенок, мм ( $\text{мм}^3$ );  $a_{\min}$  – размер (объем) образца в абр. сух. состоянии, мм ( $\text{мм}^3$ ).

Экспериментальное определение полной радиальной, тангенциальной и объемной усушки проводят согласно ГОСТ 16483.37–80 и ГОСТ 16483.38–80 на образцах в виде четырехгранной прямоугольной призмы с основанием  $20 \times 20$  мм и высотой вдоль волокон 30 мм. Годичные слои на торце образца должна быть параллельны соответствующей паре граней. Влажность образцов должна быть выше или равна пределу насыщения клеточных стенок. При меньшей влажности образцы вымачиваются в дистиллированной воде при  $t = 20 \pm 5^\circ\text{C}$ . Через каждые 3 сут. измеряют соответствующий размер у двух-трех образцов из партии. После того как расхождение между результатами двух последних измерений окажется менее 0,02 мм, образец осушают с поверхности фильтровальной бумагой и определяют его окончательные поперечные размеры по серединам радиальных и тангенциальных поверхностей, а также при необходимости размер между торцами с погрешностью не более 0,01 мм. Таким образом устанавливают исходный размер  $a_{\max}$  для определения тангенциальной или радиальной линейной усушки. Определение усушки вдоль волокон в виду ее малости стандартом не предусматривается.

Далее образцы, предварительно подсушенные в течение 2 сут. (во избежание растрескивания), досушивают до постоянных размеров, постеп-

пенно поднимая температуру до  $103 \pm 2$  °С. Изменение размеров двух-трех контрольных образцов проверяют повторными измерениями через 2 ч. после 6 ч. с начала высушивания. Сушку прекращают, когда разница между двумя последовательными измерениями будет не более 0,02 мм. Допускается прекращать сушку по достижении постоянной массы. У высушенных образцов по тем же направлениям после охлаждения в герметичных сосудах с гигроскопическим веществом измеряют новые размеры  $a_{\min}$  и вычисляют по формуле (8) линейную (радиальную или тангенциальную) усушку  $\beta_{r_{\max}}$  или  $\beta_{t_{\max}}$ . Результат округляют до 0,1 %. Объемную усушку  $\beta_{V_{\max}}$  определяют, подставляя в формулу вместо  $a_{\max}$  и  $a_{\min}$  произведение поперечных и продольного размеров образца или объем, измеренный ртутным объемомером, при  $W \geq W_{\text{п.н}}$  и в абсолютно сухом состоянии.

Полная усушка древесины наиболее распространенных отечественных лесных пород в тангенциальном направлении составляет 8–10 %, в радиальном направлении 3–7 %, вдоль волокон 0,1–0,3 %. Полная объемная усушка находится в пределах 11–17 %. Для расчетов влажностной деформации необходимо располагать коэффициентом усушки, определяющим величину усушки при снижении содержания связанной воды в древесине на 1 %.

По стандарту принято, что усушка пропорциональна падению влажности от предела насыщения клеточных стенок  $W_{\text{п.н}} = 30$  %. Коэффициент усушки  $K_{\beta}$ , % на 1 % влажности древесины, вычисляют по формуле

$$K_{\beta} = \frac{\beta_{\max}}{30}. \quad (9)$$

Результаты вычислений округляют до 0,01 % на 1 % влажности.

На самом деле зависимость  $\beta = f(w)$  – нелинейна и усушка не всегда начинается от  $W = 30$  %. Поэтому для более точных расчетов следует применять дифференциальный коэффициент усушки:

$$K'_{\beta} = \frac{d\beta}{dw}. \quad (10)$$

По исследованиям, проведенным в последнее время в МГУЛ (совместно с Г.А. Горбачевой и Н.В. Скуратовым) на древесине дуба, бук, клена, груши, черешни, средний дифференциальный коэффициент усушки в области  $W_{\text{п.н}} - 0$  % меньше стандартного на 18–43 %, а в области  $W_{\text{п.н}} - 20$  % на 51–71 %.

Для определения частичной усушки, %, при высыхании древесины до нормализованной влажности, равной обычно 12 % используют формулу

$$\beta_{12} = \frac{100(a_{\max} - a_{12})}{a_{\max}}, \quad (11)$$

где  $a_{12}$  – размер (объем) образца при нормализованной влажности, мм ( $\text{мм}^3$ ).

При необходимости по формуле, аналогичной (11), можно определить частичную усушку  $\beta_w$  при снижении влажности до любого значения  $W < W_{n,n}$ , измерив размер (объем) образца  $a_w$ .

Об усушке древесины наиболее распространенных пород можно судить по данным, приведенным в табл. 15. Следует иметь в виду, что приводимые в изданной до начала 70-х годов справочной литературе, в том числе и в Руководящих технических материалах (РТМ) "Древесина, показатели физико-механических свойств" (1962), коэффициенты определены по усушке, величина которой исчислялась как отношение уменьшения размеров (объема) образца к его размеру (объему) в абсолютно сухом состоянии. Таким образом, в этих справочниках даются не коэффициенты усушки, а коэффициенты разбухания (см. ниже).

Коэффициент усушки  $K_\beta$  можно вычислить по коэффициенту разбухания  $K_\alpha$  (принимая  $W_{n,n} = 30 \%$ ) по формуле

$$K_\beta = \frac{100 K_\alpha}{(100 + 30 K_\alpha)}, \quad (12)$$

поэтому в табл. 15 наряду с известными значениями коэффициентов разбухания  $K_\alpha$  из РТМ даны пересчитанные нами по формуле (12) средние значения коэффициентов усушки  $K_\beta$ .

Если известны значения коэффициентов радиальной  $K_{\beta_r}$  и тангенциальной  $K_{\beta_t}$  усушки, то, принимая  $W_{n,n} = 30 \%$ , можно достаточно точно определить значение коэффициента объемной усушки  $K_{\beta_v}$  по формуле

$$K_{\beta_v} = K_{\beta_r} + K_{\beta_t} - 0,3 K_{\beta_r} K_{\beta_t}. \quad (13)$$

### 15. Коэффициенты усушки $K_\beta$ и разбухания $K_\alpha$ древесины

Порода	Коэффициент усушки и разбухания %/% влажности					
	по объему		по радиальному направлению		по тангенциальному направлению	
	$K_\beta$	$K_\alpha$	$K_\beta$	$K_\alpha$	$K_\beta$	$K_\alpha$
Лиственница	0,52	0,61	0,19	0,20	0,35	0,39
Сосна	0,44	0,51	0,17	0,18	0,28	0,31
Ель	0,43	0,50	0,16	0,17	0,28	0,31
Пихта сибирская	0,39	0,44	0,11	0,11	0,28	0,31
Кедр	0,37	0,42	0,12	0,12	0,26	0,28
Береза	0,54	0,64	0,26	0,28	0,31	0,34
Бук	0,47	0,55	0,17	0,18	0,32	0,35
Ясень	0,45	0,52	0,18	0,19	0,28	0,31
Дуб	0,43	0,50	0,18	0,19	0,27	0,29
Осина	0,41	0,47	0,14	0,15	0,28	0,30
Клен	0,46	0,54	0,19	0,20	0,29	0,32

Усушку в направлении промежуточном между радиальным и тангенциальным можно найти по формуле

$$\beta_\theta = \beta_r \sin^2 \theta + \beta_t \cos^2 \theta, \quad (14)$$

где  $\theta$  – угол между направлением измерения и радиальным направлением.

От усушки следует отличать сморщивание древесины (коллапс), которое происходит у нагретой древесины вследствие удаления свободной воды при влажности  $W > W_{\text{ни}}$ . По исследованиям ВЛТИ у дуба при 70–80 °C сильно сморщиваются желатинозные волокна и древесная паренхима. Встречается коллапс и у других лиственных пород (маньчжурский ясень и др.).

Наблюдаемое при сушке уменьшение размеров пиломатериалов следует называть усадкой. Она включает кроме собственно усушки, деформацию от сушильных напряжений и, возможно, коллапс. По данным Е.А. Пинчевской коллапс существенно увеличивает усадку дубовых досок по их толщине.

Усадка древесины учитывается при распиловке бревен на доски (припуски на усушку).

**Внутренние напряжения в древесине.** Внутренними принято называть напряжения, возникающие без участия внешних нагрузок в результате неодинаковых изменений объема; они уравновешены в пределах данного тела. При высыхании древесины образуются сущильные напряжения. Согласно концепции автора (1953 г.), воспринятой у нас и за рубежом [60],

полные сушильные напряжения рассматриваются как совокупность двух составляющих – влажностных и остаточных напряжений. Влажностные напряжения вызваны неоднородной усушкой материала. В поверхностных зонах доски, где влажность ниже, чем в центре, из-за стеснения усушки возникают растягивающие напряжения, а внутри доски – сжимающие. Остаточные напряжения обусловлены появлением в древесине неоднородных остаточных деформаций, вызванных не только тем, что древесина не является идеально упругим материалом, но и тем что образуются очень большие "замороженные" остаточные деформации из-за перерождения части упругих деформаций при сушке вследствие увеличения жесткости нагруженной древесины. Остаточные напряжения в отличие от влажностных не исчезают при выравнивании влажности в доске и наблюдаются как во время сушки, так и после ее полного завершения.

Знаки влажностных и остаточных напряжений противоположны, и результирующие полные напряжения представляют собой алгебраическую сумму. В первом периоде сушки влажностные напряжения больше остаточных, и полные напряжения, имея знак большей составляющей, проявляются как растягивающие у поверхности сортимента и сжимающие – внутри. Во втором периоде остаточные напряжения превышают влажностные, и результирующие напряжения меняют знак.

Если растягивающие напряжения достигают предела прочности древесины на растяжение поперек волокон, появляются трещины. Так образуются поверхностные трещины в начале сушки и внутренние трещины (свищи) в конце её. Эти трещины (наружные и внутренние) обычно имеют радиальное направление, так как разрыв тканей происходит вдоль серцевинных лучей вследствие сравнительно слабой связи между ними и древесными волокнами.

Остаточные напряжения, сохраняющиеся в высшенном материале, могут стать причиной изменения заданной формы деталей при механической обработке древесины.

Количественная характеристика остаточных напряжений может быть установлена с помощью разработанного автором [63] и позднее стандартизованного (ГОСТ 11603–73) метода. Из доски на расстоянии 0,3 м от торца выпиливают три секции Д, М и В толщиной (по волокну) 15 мм, захватывая все сечение. Секцию В немедленно взвешивают для определения начальной влажности. Затем у всех трех секций выравнивают влажность (неравномерность не должна превышать 1 %), доводя ее до нормализованного значения ( $\approx 12\%$ ) выдержкой при комнатной или повышенной до  $60^{\circ}\text{C}$  температуре и соответствующей влажности воздуха. Секцию В вновь взвешивают для определения влажности в момент испытаний. Секцию Д размечают на слои – полоски толщиной 4 мм. На коротких кромках секции делают наколы. Начальную длину слоев  $a_1$  (рис. 26, а) измеряют с погрешностью до 0,01 мм индикаторной скобой, вводя острия ее наконечников в

наколы (заплечики на штифтах препятствуют внедрению остриев в древесину). Затем секцию раскалывают на слои, которые (особенно крайние) заметно изгибаются (рис. 26, б). Для измерения конечной длины  $a_2$  их предварительно выпрямляют в струбцине (рис. 26, в). Деформацию  $\varepsilon$  вычисляют, округляя результат до  $10^{-4}$  по формуле

$$\varepsilon = \frac{(a_1 - a_2)}{a_1}. \quad (15)$$

Секцию М распиливают на образцы толщиной примерно 8 мм, по которым при испытаниях на изгиб определяют модуль упругости (рис. 26, г). Образец нагружают ступенчато. Расстояние между нажимными ножами составляет половину пролета  $l$ . Величина ступени нагрузки при пролете до 14 см для хвойных пород 2,5 Н\*, для лиственных пород и лиственницы – 5,0 Н; при больших пролетах нагрузка в 2 раза меньше. Нагружение проводят до явного нарушения пропорциональной зависимости между усилиями и прогибами.

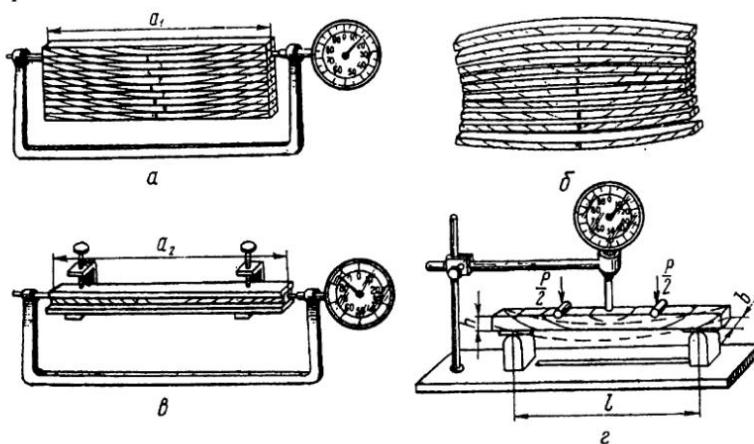


Рис. 26. Определение остаточных напряжений в древесине:  
а – измерение начальной длины слоев; б – вид слоев секции после раскюя; в – измерение конечной длины слоев; г – определение модуля упругости

Для каждой четной ступени нагрузки измеряют прогиб образца  $f$  с погрешностью до 0,01 мм и определяют модуль упругости в ГПа с точностью до 10 МПа\*\* по формуле

\* В системе СИ усилия выражаются в ньютонах (Н). С округлением можно считать, что 1 кгс=10 Н (точно 1 кгс=9,80665 Н).

\*\* 1 МПа=10<sup>6</sup> Н/м<sup>2</sup>≈10 кгс/см<sup>2</sup>.

$$E = \frac{11Pl^3}{64bh^3f}, \quad (16)$$

где  $P$  – нагрузка на оба ножа, Н;  $b$  и  $h$  – соответственно ширина и высота образца, мм;  $l$  – пролет, см;  $f$  – прогиб, мм.

По полученным значениям  $E$  для отдельных ступеней нагрузки вычисляют среднее значение модуля упругости каждого образца секции. Для построения эпюры напряжений (рис. 27) на диаграмме наносят кривые распределения деформаций (пунктирная линия) и модуля упругости. На основании данных о величине  $\epsilon$  и  $E$  вычисляют напряжения для каждого слоя, округляя результат до 0,01 МПа, по формуле

$$\sigma = -E\epsilon. \quad (17)$$

Внутренние напряжения противоположны по знаку измеренной упругой деформации, поэтому перед правой частью формулы стоит "минус".

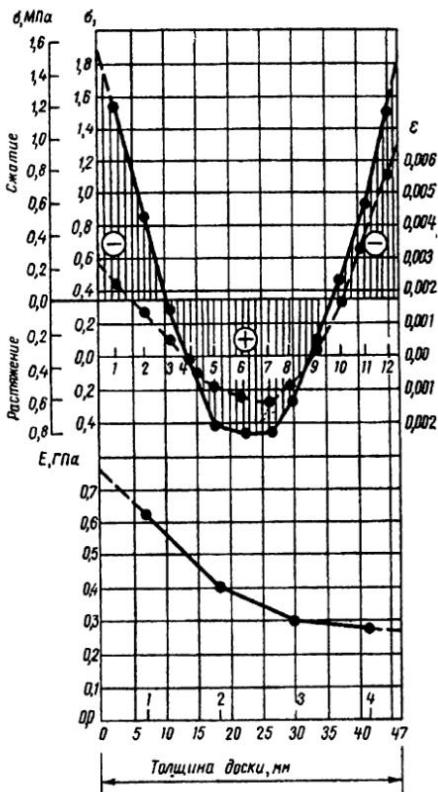


Рис. 27. Эпюра остаточных напряжений в сосновой доске после камерной сушки

В связи с тем, что при выпрямлении слоев перед измерением конечной длины образуются дополнительные деформации, нулевую линию перемещают вверх настолько, чтобы сумма площадей эпюры над ней оказалась равной площади под ней (условие равновесия). Напряжения отсчитывают по второй шкале эпюры. На рис. 27 изображена эпюра остаточных напряжений в сосновой доске после камерной сушки (влажность 9 %).

Величина остаточных напряжений зависит от способа и режима сушки. Чем интенсивней процесс сушки, тем выше остаточные напряжения. Так, после атмосферной сушки сосновых и

еловых пиломатериалов сжимающие напряжения в поверхностных зонах не превышали 0,5 МПа, а растягивающие во внутренней зоне – 0,2 МПа. После камерной сушки напряжения в поверхностных и внутренней зоне у тех же досок могут доходить соответственно до 4,4 и 1,7 МПа. У твердых лиственных пород и лиственницы остаточные напряжения выше, чем у остальных пород, например, у бука сжимающие напряжения составляли 7,2 МПа.

Описанным выше способом устанавливают средние по ширине доски напряжения. Для определения максимальных напряжений найденные величины надо умножить на коэффициент 1,3.

Стандартизованный метод с некоторыми усложнениями (учет усушки в процессе испытаний и предохранение от высыхания образцов для измерения модуля упругости) может быть использован для измерения полных напряжений в процессе атмосферной сушки и низкотемпературной камерной сушки, а также после окончания любых видов сушки (при невыравненной по сечению сортимента влажности). Внутренние напряжения могут появляться в древесине не только при сушке, но и при пропитке ее жидкостями, а также в процессе роста дерева.

**Коробление древесины.** Изменение заданной формы пиломатериалов и заготовок при сушке, а также выпиловке и хранении называется короблением.

Вследствие анизотропии усушки так называемое структурное коробление может наблюдаться в поперечной и продольной плоскостях сортимента. В чистом виде поперечное коробление проявляется при удалении воды через торцевые поверхности очень коротких сортиментов. Возникающая при этом поперечная покоробленность (рис. 28) зависит от разницы в радиальной и тангенциальной усушки, а также от расположения годичных слоев на торце сортимента. Форма поперечного сечения покоробленных досок может быть определена по уравнениям

$$\begin{aligned} u &= -\Delta W \left[ K_r x - (K_r - K_t) y \operatorname{arctg} \left( \frac{x}{y} \right) \right], \\ v &= -\Delta W \left[ K_r y + (K_r - K_t) x \operatorname{arctg} \left( \frac{x}{y} \right) \right], \end{aligned} \quad (18)$$

где  $u$  и  $v$  – компоненты перемещения точек поперечного сечения сортимента после высыхания (рис. 28, а);  $x$  и  $y$  – координаты точек до высыхания;  $K_r$  и  $K_t$  – коэффициенты радиальной и тангенциальной усушки;  $\Delta W = W_{n,n} - W_k$  – перепад влажности между пределом насыщения клеточных стенок  $W_{n,n}$  и конечной влажностью  $W_k$ .

Эти уравнения получены Г.Н. Петрухиным (МЛТИ) на основании теории упругости. Из них следует, что все доски, кроме чисто радиальных, после высыхания будут иметь желобчатую форму (рис. 28, а). Для определения стрелы прогиба П.А. Афанасьевым еще в 1879 г. была получена формула, также вытекающая из уравнения (18). Прогиб тем больше, чем ближе доска к сердцевине. Максимальная стрела прогиба доски, на нижней пласти которой находится сердцевина, при ширине  $B$  может быть определена по формуле

$$f_{\max} = \frac{\pi}{2} (W_{n,h} - W_k) (K_t - K_r) \frac{B}{2}. \quad (19)$$

На рис. 28, б, в, г показаны и другие виды покоробленности: трапециевидная — у строго радиальных досок, ромбовидная — у брусьев с диагональным расположением годичных слоев, овальная — у цилиндрических заготовок.

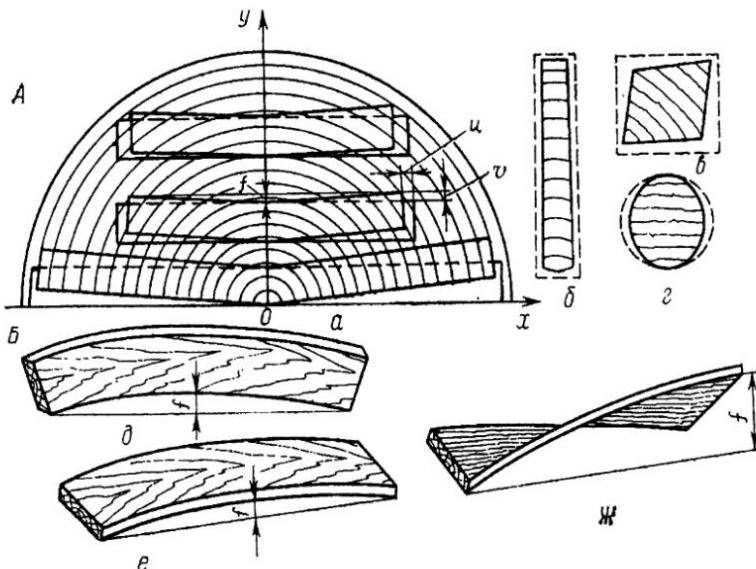


Рис. 28. Виды покоробленности:  
А – поперечная: а – желобчатая; б – трапециевидная; в – ромбовидная; г – овальная; Б – продольная: д – по кромке; е – по пласти; ж – крыловатость

Продольная покоробленность возникает из-за различий в усушке по длине волокон. Покоробленность по кромке (рис. 28, д) и пласти (рис. 28, е) возникает, если в доске оказываются участки разной по строению древесины. Такая покоробленность встречается, например, у досок,

включающих участки креневой\* или примыкающей к сердцевине молодой (ювенильной) древесины, которые обладают большей усушкой вдоль волокон, чем нормальная древесина. Спиральная покоробленность — крыловатость появляется у древесины с наклоном волокон. Поперечную желобчатую и продольную покоробленность измеряют по максимальной стреле прогиба, а крыловатость — по наибольшему отклонению поверхности доски от плоскости.

При высыхании сравнительно длинных сортиментов вода удаляется в основном через их боковые поверхности и поперечное коробление происходит также вследствие неравномерного распределения влажности по сечению. Покоробленность, вызванная этой причиной, при выравнивании влажности по сечению доски исчезает. В высушенном материале из-за нарушения равновесия остаточных напряжений происходит коробление при несимметричном строгании (фрезеровании) досок или их ребровом делении.

Коробление досок может наблюдаться и при распиловке сырых бревен из-за напряжений, имеющихся в растущем дереве. Иногда причиной коробления досок является неправильная укладка их в штабеля при атмосферной и камерной сушке, увлажнение при хранении и др.

Способность древесины к короблению — серьезный недостаток, затрудняющий ее обработку и использование в конструкциях и изделиях в условиях переменной влажности. Коробление досок при сушке можно уменьшить путем приложения внешних усилий (от веса вышележащих частей штабеля или при помощи специальных прижимов).

**Влагопоглощение.** Способность древесины вследствие ее гигроскопичности поглощать влагу (пары воды) из окружающего воздуха называется влагопоглощением.

Процесс влагопоглощения складывается из сорбции паров воды основными органическими веществами клеточной стенки и перемещения образовавшейся связанный воды в глубь древесины. Сорбция, в свою очередь, включает явления адсорбции и микрокапиллярной конденсации. При соприкосновении влажного воздуха с абсолютно сухой древесиной на поверхности мельчайших структурных образований из целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз концентрируются молекулы воды. Сначала происходит связывание влаги в мономолекулярном слое (толщиной в одну молекулу воды), который особенно прочно удерживается органическими веществами древесины. Затем появляется полимолекулярный слой с постепенно убывающей прочностью связей между молекулами воды и компонентами древесины. Так образуется находящаяся в пленочном состоянии адсорбционная вода, по своим свойствам отличающаяся от обычной воды.

При сорбции влаги происходит контракция, выражющаяся в том, что объем увлажненной древесины оказывается меньше суммы объе-

\* Кренъ и наклон волокон — пороки строения древесины (описаны в гл. 7).

мов сухой древесины и поглощенной воды. Плотность первых порций адсорбированной воды составляет  $1,1\text{--}1,2 \text{ г}/\text{см}^3$ . Известна теория строения обычной воды, по которой в ее состав кроме свободных молекул входят кластиры – постоянно образующиеся и распадающиеся агрегаты молекул [31]. Плотность кластеров  $0,92 \text{ г}/\text{см}^3$ , а неагрегатированной воды –  $1,12 \text{ г}/\text{см}^3$ . Компоненты древесины разрушают кластиры и увеличивают относительное содержание неагрегатированной части воды, тем самым повышая общую ее плотность. Адсорбционная вода похожа по упругим свойствам на твердое тело, она не растворяет обычно растворимые в воде вещества, неэлектропроводна, по диэлектрической проницаемости близка к древесине, а по теплоемкости – ко льду. Мономолекулярные слои адсорбционной воды в древесине не замерзают [74].

Кроме явления адсорбции происходит конденсация паров воды в микрокапиллярах (микроуглублениях) клеточной стенки.

Типичная кривая изменения содержания связанной воды в древесине при сорбции в зависимости от степени влажности окружающего воздуха в условиях комнатной температуры (изотерма сорбции) показана на рис. 29. Начало изотермы отражает процесс связывания воды в мономолекулярном слое. Этот процесс завершается при  $\phi > 20\%$  (по некоторым данным идет до  $\phi = 60\%$ ) и лишь затем появляется полимолекулярный слой. Микрокапиллярная конденсация начинается с  $\phi = 60\text{--}90\%$ . По данным Б.С. Чудинова [75] это  $\phi$  составляет  $70\%$ . При  $\phi$ , приближающемся к  $100\%$  влажность древесины достигает предела гигроскопичности, который, как указывалось выше, при комнатной температуре в среднем равен  $30\%$ , а при повышении температуры снижается примерно на  $0,1\%$  на  $1^\circ\text{C}$ .



Рис. 29. Изотерма сорбции древесины при комнатной температуре

Сорбционная способность в большей мере выражена у гемицеллюлоз, слабее – у целлюлозы и еще меньше у лигнина [31]. Повышенную способность гемицеллюлоз к поглощению влаги подтверждают исследования И.И. Пищика (МЛТИ)

древесины длительной выдержки (до 700 лет). При "старении" древесины, вызывающем уменьшение содержания гемицеллюлоз, происходит снижение ее гигроскопичности.

Влагопоглощение ядра и заболони примерно одинаково. По сорбционной способности кора мало отличается от древесины. Влажность древеси-

сины, которая может быть достигнута в процессе влагопоглощения при разной температуре, определяется по диаграмме (см. рис. 23).

Для получения сравнительной характеристики хода процесса увлажнения древесины проводят испытания согласно ГОСТ 16483.19–72, который устанавливает метод определения влагопоглощения при выдерживании образцов над насыщенным раствором соды. Образцы в виде прямоугольной призмы с основанием 20×20 мм и высотой вдоль волокон 10 мм, высушивают в бюксах до абсолютно сухого состояния и взвешивают с точностью до 0,001 г. На дно эксикатора наливают насыщенный раствор соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), что обеспечивает относительную влажность воздуха над раствором  $\phi = 92\%$ . Применение раствора соды вместо чистой воды уменьшает возможность конденсации паров воды при колебаниях температуры во время испытаний. Образцы помещают в эксикатор и периодически извлекают для взвешивания через 1, 2, 3, 6, 9, 13, 20 и далее через 10 сут. Минимальная продолжительность выдержки должна быть 30 сут. Испытание заканчивают, когда разность между двумя последними взвешиваниями окажется не более 0,002 г. По результатам взвешивания определяют текущую влажность образца с погрешностью 1% и строят график "влажность древесины – время выдержки". Этот график, на котором влажность возрастает с убывающей скоростью, а также максимальная влажность древесины служат характеристикой влагопоглощения.

Способность к поглощению влаги – отрицательное свойство древесины. Высушенная древесина в изделиях "дышил", изменения содержание связанной воды при колебаниях температуры и относительной влажности окружающего воздуха. Будучи помещенной в очень влажную среду, она сильно увлажняется, что ухудшает ее физико-механические характеристики и приводит к ряду других нежелательных последствий. Создаваемые на поверхности деревянных деталей и изделий декоративные покрытия из лакокрасочных и пленочных материалов выполняют также влагозащитные функции. Однако более радикальное средство уменьшения гигроскопичности древесины – ее модификация путем пропитки искусственными смолами.

**Разбухание.** Повышение содержания связанный воды в древесине при выдерживании во влажном воздухе или воде сопровождается увеличением линейных размеров и объема древесины. Это явление называется разбуханием. Таким образом, разбухание древесины – свойство, обратное усушки и подчиняющееся в основном тем же закономерностям.

Экспериментальное определения полного радиального, тангенциального и объемного разбухания проводят согласно ГОСТ 16483.35–80 и ГОСТ 16483.36–80, используя оборудование и процедуру (в иной последовательности), применяемые для определения усушки. Однако способы вычисления показателей другие.

Полное разбухание, %, вычисляют, округляя результат до 0,1% по формуле

$$\alpha_{\max} = \frac{100(a_{\max} - a_{\min})}{a_{\min}}, \quad (20)$$

где  $a_{\max}$  – размер (объем) образца при влажности, равной или выше предела насыщения клеточных стенок,  $\text{мм}(\text{м}^3)$ ;  $a_{\min}$  – размер (объем) образца в абсолютно сухом состоянии,  $\text{мм}(\text{м}^3)$ .

Следовательно, увеличение размеров образца относят к его исходному размеру в абсолютно сухом состоянии.

Коэффициент разбухания вычисляют, округляя результат до 0,01 % на 1 % влажности по формуле

$$K_a = \frac{\alpha_{\max}}{W_{n,n}}, \quad (21)$$

где  $W_{n,n}$  – предел насыщения клеточных стенок (равный в среднем 30 %).

Как и для усушки, предусматривается возможность определения частичного разбухания древесины при увлажнении до нормализованной влажности (12 %). В этом случае разбухание, %, вычисляют по формуле

$$\alpha_{12} = \frac{100(a_{12} - a_{\min})}{a_{\min}}, \quad (22)$$

где  $a_{12}$  – размер (объем) образца при нормализованной влажности,  $\text{мм}(\text{м}^3)$ .

При необходимости по аналогичной формуле (22) можно вычислить частичное разбухание в случае повышения влажности до любого другого значения, меньшего  $W_{n,n}$ .

Средние значения коэффициентов разбухания древесины основных пород в радиальном и тангенциальном направлениях, а также по объему приведены в табл. 15. Коэффициенты объемного разбухания можно определить по формуле, аналогичной (13), но только со знаком "+" перед последним членом.

Так же как и усушка, наибольшее разбухание древесины наблюдается в тангенциальном направлении поперек волокон, а наименьшее – вдоль волокон.

Коэффициенты объемного разбухания коры, определенные методом высушивания, [36] оказываются выше, чем у древесины. Так, у сосны древесина имеет  $K_a$ , равный в среднем 0,51, а кора 0,66; у ели соответственно 0,5 и 0,79; у березы 0,64 и 0,92 % на 1 % влажности.

Разбухание древесины вызвано тем, что связанная вода, размещенная в клеточных стенах, раздвигает микрофибриллы. Хотя в среднем между количеством поглощенной связанной воды и величиной разбухания существует прямая, близкая к линейной, зависимость, наблюдаются некоторые отклонения. Так, например, при сорбции в воздухе первых порций влаги,

когда влажность увеличивается от 0 до 0,7 % у древесины лиственницы в тангенциальном направлении обнаружено [75] не увеличение, а уменьшение размеров образца ("отрицательное" разбухание). Строгая пропорциональная зависимость отсутствует и при дальнейшем увеличении влажности до 5–6 %, что связывают с контракцией системы древесина – вода. При более высокой влажности порядка 20 % Ю.М. Иванов наблюдал у образцов древесины сосны и бука вслед за увеличением размеров вдоль волокон их укорочение. Кривые зависимости усушки и разбухания от влажности не совпадают из-за гистерезиса разбухания (аналогичного гистерезису сорбции). Сложный механизм явлений разбухания пока еще полностью не выяснен.

С давних пор известна способность древесины при стеснении разбухания развивать большие давления: разбухающими от воды деревянными клиньями раскалывали камни. Первое научное исследование этого свойства древесины провел еще в 1813 г. В.В. Петров. В наше время определением величины давления набухания, возникающего вследствие препятствий свободному увеличению размеров (объема) древесины при поглощении связанной воды, занимались Ю.М. Иванов, Т. Перкинтий, Я. Рачковский, Г.С. Вердиньш и другие исследователи.

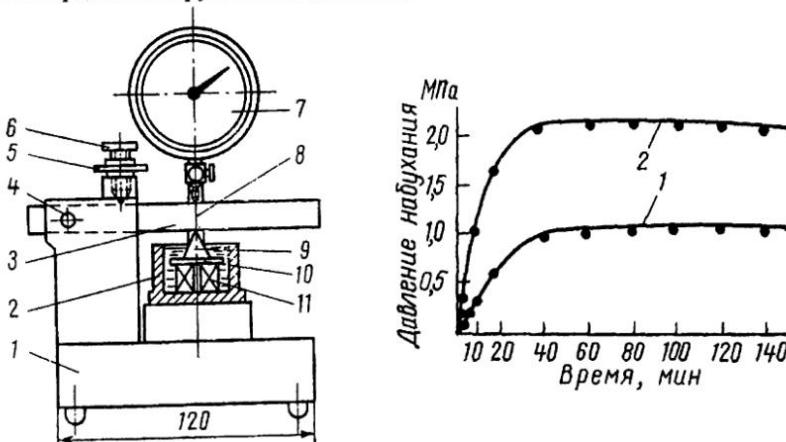


Рис. 30. Схема прибора для измерения давления набухания древесины:  
1 – станина; 2 – стакан; 3 – рычаг; 4 – ось рычага; 5 – контргайка; 6 – упорный винт; 7 – индикатор; 8 – риска на рычаге; 9 – призма; 10 – прокладка; 11 – образец

Рис. 31. Измерение давления набухания во время испытаний древесины ядра сосны:  
1 – в радиальном; 2 – в тангенциальном направлении (по Ю.М. Иванову)

По стандартизованной методике (ГОСТ 16483.14-72) определение давления набухания проводят следующим образом. Два образца в виде призмы основанием 12×12 мм и толщиной вдоль волокон 8 мм, выпилен-

ные из одного бруска, в сушильном шкафу доводят до абсолютно сухого состояния, охлаждают и испытывают в приборе, схема которого дана на рис. 30. Образцы 11 помещают в стакан 2. Поверх образцов размещают металлическую прокладку 10 и призму 9. Ребро призмы должно находиться под риской 8 рычага 3, ось которого 4 заключена в шарикоподшипник. На рычаг у риски опирают штифт индикатора часового типа 7 с погрешностью до 0,001 мм. Рычаг прижимают к ребру призмы и закрепляют винтом 6. В стакан наливают воду и включают секундомер. Усилия, возникающие от стеснения деформаций разбухания, вызывают прогиб заранее тарированного упругого элемента – рычага 3. Прогиб рычага составляет весьма небольшую долю от свободной деформации разбухания и не отражается существенно на величине измеряемого усилия. Испытания проводят до тех пор, пока приращение прогиба окажется меньше 4 мкм.

Зная тарировочный коэффициент, по прогибу рычага определяют величину усилий и, разделив ее на суммарную площадь поверхности обеих образцов, вычисляют давление набухания в данный момент испытаний. По полученным данным строят график зависимости давления набухания от времени испытаний (рис. 31). Показателем исследуемого свойства древесины служит максимальная величина давления набухания. На том же приборе можно определить ход роста (кинетику) деформаций свободного разбухания в радиальном или тангенциальном направлениях.

Величина давления набухания некоторых пород по данным Ю.М. Иванова приведена в табл. 16. Давление набухания зависит от плотности древесины. Чем больше содержится в единице объема древесинного вещества, слагающего клеточные стенки, тем выше давление набухания. Расчеты показывают, что этот показатель для самого древесинного вещества может достигать нескольких десятков МПа. Поскольку измеряемое на образцах древесины давление набухания зависит от податливости клеточных стенок, оно по крайней мере на порядок меньше.

В тангенциальном направлении у хвойных пород давление набухания примерно в 1,5–2 раза выше, чем в радиальном (рис. 31). Такое же соотношение характерно для некоторых лиственных пород (дуб). Однако для ряда рассеяннососудистых лиственных пород не наблюдается увеличения давления набухания в тангенциальном направлении по сравнению с радиальным. Это указывает на то, что не только стесненная влажностная деформация, но и жесткость древесины в данном структурном направлении определяет величину давления набухания. Об этом свидетельствует также уменьшение давления набухания при повышении температуры, что вызывает снижение жесткости древесины.

Древесина разбухает при поглощении не только воды, но и других жидкостей, причем величина разбухания прямо зависит от диэлектрической постоянной жидкости. Например, при поглощении 30 % раствора формамида (диэлектрическая постоянная формамида в 1,35 раза больше,

чем воды) разбухание березы в 1,2 раза больше, чем от воды, а при поглощении ацетона, имеющего в 4 раза меньшую диэлектрическую постоянную, разбухание древесины сосны в 1,5 раза меньше, чем от воды. Практически не вызывают разбухания древесины такие жидкости, как керосин, диэлектрическая постоянная которого в 40 раз меньше, чем у воды.

### 16. Давление набухания древесины некоторых пород, МПа

Порода, зона дре- весины	Средняя плотность в абс. сух. состоянии	Структурное направление	Температура, °C	
			18–20	83–86
Сосна:				
заболонь	540	Тангенциальное	1,98	0,94
ядро	620	То же	—	1,44
ядро	620	Радиальное	—	0,76
Лиственница:				
заболонь	530	Радиальное	0,74	—
ядро	710	—"	0,91	—
Бук	760	Тангенциальное	3,87	1,82
Ольха	490	То же	1,86	—
—"	490	Радиальное	1,42	—
Дуб:				
ядро	640	Тангенциальное	3,10	—
ядро	640	Радиальное	1,54	—

Разбухание древесины зависит от содержания и степени гигроскопичности входящих в клеточные стенки компонентов. Большую роль играет характер размещения и взаимосвязей компонентов древесины.

Способность древесины разбухать в некоторых случаях полезна, так как она обеспечивает уплотнение соединений в бочках, чанах, деревянных трубах, судах и т. д. Однако чаще всего из-за разбухания и связанного с ним коробления возникают серьезные затруднения при обработке и использовании древесины. Модифицирование древесины, уменьшающее ее гигроскопичность, снижает и разбухание.

**Водопоглощение.** Вследствие пористого строения при непосредственном контакте с водой древесина способна увеличивать свою влажность. Это свойство древесины называется **водопоглощением**. Максимальная влажность, которой достигает погруженная в воду древесина, складывается из наибольших количеств связанный воды (предел насыщения клеточных стенок) и свободной воды. Количество свободной воды зависит от объема пустот в древесине, поэтому чем больше плотность древесины, тем меньше ее влажность, характеризующая максимальное водопоглощение.

Максимальную влажность, %, определяют по формуле

$$W_{\max} = W_{n,h} + \frac{(\rho_{d,e} - \rho_0) \rho_e}{\rho_{d,e} \cdot \rho_0} 100, \quad (23)$$

где  $W_{n,n}$  – влажность предела насыщения клеточных стенок, %;  $\rho_{\text{д.в}}$  – плотность древесинного вещества,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $\rho_0$  – плотность древесины в абсолютно сухом состоянии,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $\rho_w$  – плотность воды,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Первый член этой формулы характеризует максимальное количество связанной воды, второй – содержание свободной воды, заполняющей все пустоты в древесине.

Если неизвестно точное значение  $W_{n,n}$ , то максимальную влажность, %, можно вычислить по другой формуле:

$$W_{\max} = \frac{(\rho_{\text{д.в}} - \rho_b) \rho_w}{\rho_{\text{д.в}} \cdot \rho_b} \cdot 100, \quad (24)$$

где  $\rho_b$  – базисная плотность древесины,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Принимая плотность воды  $1 \text{ г}/\text{см}^3$  и используя средние значения базисной плотности, получим по формуле (24) ориентировочные значения максимальной влажности древесины некоторых пород (табл. 17).

### 17. Максимальная влажность древесины при водопоглощении

Порода	Влажность, %.	Порода	Влажность, %.
Лиственница	126	Граб	93
Сосна	185	Дуб	116
Ель	212	Береза	135
Кедр (сосна кедровая)	220	Осина	185
Пихта	268	Тополь	212

Расчетные значения  $W_{\max}$  оказываются несколько выше найденных экспериментальным путем, так как за время даже очень продолжительных опытов не все пустоты внутри древесины заполняются водой из-за наличия смолы, закупорки сосудов тиллами и т. д.

Скорость процесса водопоглощения зависит от размеров и формы образца: чем крупнее образцы, тем медленнее этот процесс. Значительное время занимает выравнивание влажности по объему образца. Образцы с развитой торцовой поверхностью поглощают воду достаточно быстро. Процесс водопоглощения ускоряется с повышением температуры. Количество поглощенной воды зависит от породы древесины, начальной влажности образца, анатомической зоны (заболонь поглощает больше воды, чем ядро).

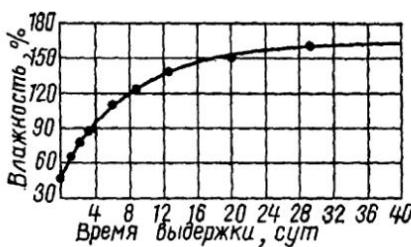
Экспериментальным путем способность древесины к водопоглощению устанавливается согласно методу, регламентированному ГОСТ 16483.20–72. Образцы в виде призмы с основанием  $20 \times 20 \text{ мм}$  и высотой вдоль волокон  $10 \text{ мм}$  высушивают до абсолютно сухого состояния. Затем образцы помещают стоячим под решетчатую вставку эксикатора с

дистиллированной водой и выдерживают при  $20 \pm 2$  °С. Периодически образцы вынимают из воды, осушают поверхность фильтровальной бумагой и взвешивают в бюксах для определения текущей влажности в процессе водопоглощения. Первое взвешивание проводят после выдержки в воде в течение 2 ч, затем через 1, 2, 3, 6, 9, 13, 20 сут. после первоначального погружения, а далее — через каждые 10 сут. Опыт заканчивают, когда разница между двумя последовательными взвешиваниями окажется менее 0,05 г.

По результатам испытания строят график "влажность — время выдержки" (рис. 32). За показатель водопоглощения принимают максимальную влажность, достигнутую в процессе испытаний, продолжительность которых должна быть не менее 30 сут.

Рис. 32. Кривая водопоглощения древесины сосны

Представление о водопоглощении коры дают ориентировочные данные РТМ [26], полученные при выдержке в воде в течение 50 сут. (табл. 18).



### 18. Водопоглощение коры

Порода	Влажность, %	Порода	Влажность, %
Лиственница	149	Береза	63
Сосна	203	Бук	55
Ель	140	Клен	71
Дуб	117	Осина	95
Вяз	102	Тополь	158

Способность древесины поглощать воду, а также другие жидкости, имеет значение в процессах варки древесины для получения целлюлозы, при пропитке растворами антисептиков и антиприренов, при сплаве лесоматериалов и в других случаях.

## § 12. Плотность

Плотность характеризуется массой единицы объема материала и имеет размерность  $\text{кг}/\text{м}^3$  или  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Плотность древесинного вещества представляет собой массу единицы объема материала, образующего клеточные стенки. Поскольку элементный химический состав практически не зависит от породы и мало отличаются по плотности образующие клеточную стенку

компоненты, плотность древесинного вещества в целом примерно одинакова. Однако величина этого показателя зависит от способа определения.

Плотность древесинного вещества  $\rho_{\text{д.в.}}$ , г/см<sup>3</sup>, в абсолютно сухом состоянии можно вычислить по формуле

$$\rho_{\text{д.в.}} = \frac{m_{\text{д.в.}}}{V_{\text{д.в.}}}, \quad (25)$$

где  $m_{\text{д.в.}}$  – масса древесинного вещества, г;  $V_{\text{д.в.}}$  – объем древесинного вещества, см<sup>3</sup>.

Пренебрегая массой воздуха, имеющего на три порядка меньшую плотность, чем древесинное вещество, можно определить достаточно точно  $m_{\text{д.в.}}$ , взвешивая небольшой образец абсолютно сухой древесины на аналитических весах. Объем  $V_{\text{д.в.}}$  древесинного вещества в образце определить труднее. Для этого применяют способы, основанные на измерении объема вытесненной образцом жидкости или газа. Используют воду, не вызывающие разбухания древесины жидкости (бензол, толуол) или газы (гелий, азот). Точность определения объема древесинного вещества, содержащегося в образце, зависит от возможности проникновения жидкости или газа в пустоты древесины. Существенную роль при этом играет также степень молекулярного взаимодействия между средой и компонентами древесины.

То обстоятельство, что использование жидкостей (толуола, минерального масла) и газа (гелия) с очень малым радиусом молекулы, равным 0,122 нм, дает примерно одинаковые результаты определения объема, свидетельствует о практически полном отсутствии микропустот в клеточной стенке. Объем этих микропустот в среднем равен всего лишь 3–4 %. Такого мнения придерживается большинство исследователей [31, 75]. Плотность древесинного вещества, определенная по объему, измеренному в толуоле, минеральном масле или гелии, составляет 1,44–1,46 г/см<sup>3</sup>.

В том случае, когда объем  $V_{\text{д.в.}}$  измеряется в воде, плотность древесинного вещества оказывается несколько выше. Это – следствие кажущегося уменьшения объема древесинного вещества из-за проникновения молекул воды в микрофибриллы. В мировой древесиноведческой литературе наиболее широко применяется показатель плотности древесинного вещества, определенный именно таким способом и равный в среднем для всех пород 1,53 г/см<sup>3</sup>. При взаимодействии древесинного вещества с неполярными жидкостями и газами следует применять в расчетах указанные выше меньшие значения  $\rho_{\text{д.в.}}$ .

Способы определения плотности древесинного вещества описаны в монографии [50].

Плотность абсолютно сухой древесины характеризует массу единицы объема древесины при отсутствии в ней воды. Этот показатель вычисляют по формуле

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \quad (26)$$

где  $\rho_0$  – плотность абсолютно сухой древесины  $\text{г}/\text{см}^3$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $m_0$  – масса образца древесины при  $W = 0$ , г, кг;  $V_0$  – объем образца древесины при  $W = 0$ ,  $\text{см}^3$ ,  $\text{м}^3$ .

Плотность древесины меньше плотности древесинного вещества, так как она включает в себя пустоты (полости клеток и межклеточные пространства, заполненные воздухом).

Зависимость между  $\rho_0$  и  $\rho_{\partial,\epsilon}$  имеет вид

$$\rho_0 = \rho_{\partial,\epsilon} \left( 1 - \frac{\Pi}{100} \right), \quad (27)$$

где  $\Pi$  – пористость древесины, %.

Пористость древесины представляет собой относительный объем пустот в абсолютно сухой древесине, %, и определяется по формуле

$$\Pi = \frac{V_0 - V_{\partial,\epsilon}}{V_0} 100 = \left( 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{\partial,\epsilon}} \right) 100, \quad (28)$$

где  $V_0$  и  $V_{\partial,\epsilon}$  – соответственно объемы образца и содержащегося в нем древесинного вещества при  $W = 0$ .

Пористость древесины наших пород колеблется в пределах 40–77 %.

Плотность влажной древесины выражается отношением массы образца при любой данной влажности к его объему при той же влажности. Формула для вычисления этого показателя имеет вид

$$\rho_W = \frac{m_W}{V_W}, \quad (29)$$

где  $\rho_W$  – плотность древесины при влажности  $W$ ,  $\text{г}/\text{см}^3$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $m_W$  – масса образца древесины при влажности  $W$ , г, кг;  $V_W$  – объем образца древесины при влажности  $W$ ,  $\text{см}^3$ ,  $\text{м}^3$ .

Увлажнение абсолютно сухой древесины приводит к увеличению массы образца. При этом повышение содержания связанной воды вызывает одновременное увеличение объема образца. Увеличение содержания свободной воды отражается только на массе образца. Зависимости между

плотностью влажной древесины  $\rho_W$  и плотностью абсолютно-сухой древесины  $\rho_0$  имеют вид

$$\rho_W = \rho_0 \frac{100 + W}{K_\alpha W + 100} \quad \text{при } W < 30\%; \quad (30)$$

$$\rho_W = \rho_0 \frac{100 + W}{K_\alpha \cdot 30 + 100} \quad \text{при } W \geq 30\%; \quad (31)$$

где  $K_\alpha$  – коэффициент объемного разбухания, % на 1 % влажности древесины.

Характер зависимости плотности древесины от влажности иллюстрирует рис. 33. Повышение содержания связанной воды (до  $W = 30\%$ ) мало влияет на плотность древесины. Увеличение содержания свободной воды приводит к повышению плотности древесины. Возрастание плотности зависит от объема пустот, которые могут быть заполнены водой, поэтому достигаемая при водопоглощении максимальная плотность древесины  $\rho_{W_{max}}$  больше отличается от  $\rho_0$  у менее плотных пород. Так, у кизила отношение этих показателей составляет 1,38. У сосны же максимальная плотность превышает плотность абсолютно сухой древесины в 2,4 раза.

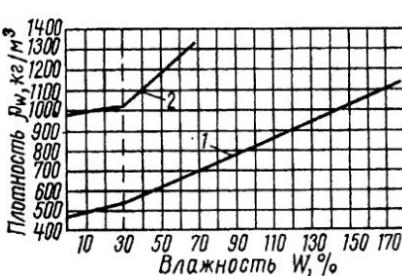


Рис. 33. Зависимости плотности древесины от влажности:

1 — сосна:  $\rho_0 = 470 \text{ кг}/\text{м}^3, K_\alpha = 0,51 \text{ \% / \%}$   
2 — кизиль:  $\rho_0 = 963 \text{ кг}/\text{м}^3, K_\alpha = 0,78 \text{ \% / \%}$

Плотность древесины при нормализованной влажности выражается отношением массы образца при влажности обычно равной 12 % к его объему при той же влажности; обозначается  $\rho_{12}$ .

Парциальная плотность древесины выражается отношением массы абсолютно сухого образца к его объему при любой данной влажности. В общем случае влажная древесина представляет собой трехфазную систему, состоящую из древесинного вещества, воздуха и воды. Поэтому плотность влажной древесины можно выразить следующим образом:

$$\rho_W = \frac{m_{\text{д.в}} + m_{\text{вз}} + m_{\text{в}}}{V_W} = \frac{m_{\text{д.в}}}{V_W} + \frac{m_{\text{вз}}}{V_W} + \frac{m_{\text{в}}}{V_W}, \quad (32)$$

где  $m_{\text{д.в}}$  – масса древесинного вещества в образце древесины;  $m_{\text{в}}$  – масса воздуха в образце древесины;  $m_b$  – масса связанной и свободной воды в образце древесины;  $V_W$  – объем образца древесины при данной влажности  $W$ .

Каждый член уравнения (32) характеризует соответствующую частичную (или, употребляя принятую в физике терминологию, – парциальную) плотность. Учитывая, что  $m_{\text{д.в}} + m_{\text{в}} = m_0$ , получим уравнение

$$\rho_W = \frac{m_0}{V_W} + \frac{m_b}{V_W}. \quad (33)$$

Первый член уравнения (33) отражает содержание (массу) сухой древесины в единице объема влажной древесины. Этот новый показатель и будем называть – парциальной плотностью древесины,  $\text{кг}/\text{м}^3$  или  $\text{г}/\text{см}^3$ :

$$\rho'_W = \frac{m_0}{V_W}. \quad (34)$$

Зная плотность древесины  $\rho_W$  при данной влажности  $W < W_{n,n}$ , можно определить

$$\rho'_W = \rho_W \frac{100}{100 + W}. \quad (35)$$

Парциальная плотность древесины зависит от влажности, которая влияет на величину  $V_W$ . Минимальное значение парциальной плотности наблюдается при наибольшем объеме  $V_{\max}$ , т.е. при  $W \geq W_{n,n}$ . Принимая этот показатель в качестве базисного, обозначим  $\rho'_{W_{n,n}} = \rho_b$ . Тогда величину парциальной плотности древесины при любой влажности в диапазоне от  $W = 0$  до  $W_{n,n}$  можно определить по формуле

$$\rho'_W = \rho_b \frac{100}{100 - K_b(W_{n,n} - W)}, \quad (36)$$

где  $K_b$  – коэффициент объемной усушки, % на 1 % влажности древесины.

Характер зависимости  $\rho'_W = f(W)$ , вытекающий из уравнения (36), при условии, что  $W_{n,n} = 30\%$ , показан на рис. 34. Максимальное значение парциальная плотность имеет при  $W = 0$ , когда она равна плотности абсолютно сухой древесины, следовательно,  $\rho'_0 = \rho_0$ .

Воздухоемкость древесины выражается отношением объема воздуха, заполняющего полости и межклеточные пространства, к объему

образца древесины данной влажности. Этот показатель  $B_W$ , %, легко определить, зная парциальную плотность  $\rho'_W$  и влажность древесины  $W$ :

$$B_W = \left( \frac{V_W - V_{\text{д.в.}} - V_e}{V_W} \right) 100 = \left[ 1 - \rho'_W \left( \frac{1}{\rho_{\text{д.в.}}} + \frac{W}{100 \rho_e} \right) \right] 100, \quad (37)$$

где  $V_W$  – объем образца древесины при данной влажности;  $V_{\text{д.в.}}$  – объем древесинного вещества в образце;  $V_e$  – объем связанной и свободной воды в образце;  $\rho_{\text{д.в.}}$  и  $\rho_e$  – соответственно плотности древесинного вещества и воды.

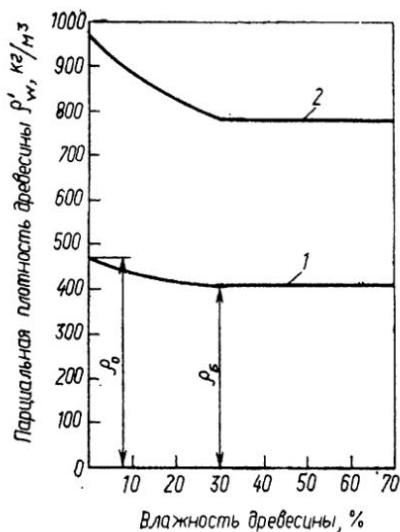


Рис. 34. Зависимость парциальной плотности древесины от влажности:  
1 – сосна:  $\rho_0 = 407 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $K_{\rho_v} = 0,44 \%/\%$   
2 – кизиль:  $\rho_0 = 963 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $K_{\rho_v} = 0,63 \%/\%$

При  $W = 0$  и  $\rho'_W = \rho_0$  формула (37) превращается в формулу (28). Следовательно, воздухоемкость абсолютно сухой древесины  $B_0$  равняется пористости  $\Pi$ . Для древесины сосны при влажности 0, 12 и 100 % воздухоемкость составляет:  $B_0 = 69 \%$ ,  $B_{12} = 66 \%$ ,  $B_{100} = 32 \%$ .

Базисная плотность древесины выражается отношением массы абсолютно сухого образца  $m_0$  к его объему при влажности равной или выше

предела насыщения клеточных стенок  $V_{\text{max}}$ . Следовательно базисная плотность,  $\text{г}/\text{см}^3$ ,  $\text{кг}/\text{см}^3$ , равна:

$$\rho_b = \frac{m_0}{V_{\text{max}}}. \quad (38)$$

Раньше это отношение минимальной массы образца к его максимальному объему называли условной плотностью древесины  $\rho_{\text{ усл.}}$ , подчеркивая кажущуюся искусственность этой характеристики. На самом деле показатель  $\rho_b$  имеет вполне определенный физический смысл, характеризуя количество (массу) сухой древесины или, что почти то же самое, массу

древесинного вещества в единице объема свежесрубленной или максимально разбухшей древесины.

Базисный характер показателя  $\rho_b$  проявляется в том, что он широко используется для расчетов процессов нагревания, сушки, пропитки древесины, определения содержания сухого вещества в древесном сырье для целлюлозно-бумажной промышленности и других целей. Этот показатель связан с плотностью абсолютно сухой древесины следующими соотношениями:

$$\rho_b = \rho_0 \left( 1 - \frac{30K_\beta}{100} \right), \quad (39)$$

где  $K_\beta$  – коэффициент объемной усушки, % на 1 % влажности древесины.

и

$$\rho_b = \rho_0 \left[ \frac{100}{100 + 30K_\alpha} \right], \quad (40)$$

где  $K_\alpha$  – коэффициент объемного разбухания, % на 1 % влажности древесины.

Если известна плотность древесины  $\rho_w$ , то базисную плотность можно вычислить по формулам:

$$\rho_b = \rho_w \frac{100(100 + K_\alpha W)}{(100 + W)(100 + K_\alpha 30)} \quad \text{при } W < 30\%; \quad (41)$$

$$\rho_b = \rho_w \frac{100}{100 + W} \quad \text{при } W \geq 30\%. \quad (42)$$

Экспериментально плотность древесины согласно ГОСТ 16483.1-84 и СТ СЭВ 388-76 определяют на образцах, имеющих форму четырехгранной прямоугольной призмы с основанием 20×20 мм и высотой вдоль волокон 30 мм. Образец должен включать не менее пяти годичных слоев. При очень широких слоях (более 4 мм) следует увеличить размеры основания образца, сохранив его квадратным. Смежные грани образцов должны располагаться строго под прямым углом. Поверхности образцов должны быть гладко остроганы. Образцы предварительно выдерживают до влажности  $12 \pm 1\%$ . На каждом образце можно определить четыре показателя: плотность древесины при влажности в момент испытаний  $\rho_w$ , плотность абсолютно сухой древесины  $\rho_0$ , парциальную  $\rho'_w$  и базисную плотность древесины  $\rho_b$ . При этом целесообразно проводить процедуру испытаний в следующем порядке.

Вначале измеряют фактические размеры поперечного сечения и высоту по осям симметрии образцов с точностью до 0,1 мм. Полученные

данные используют для вычисления объема образца  $V_w$ , м<sup>3</sup>. Взвешиванием образцов с погрешностью до 0,01 г определяют массу  $m_w$ , кг. Далее образцы увлажняют в дистиллированной воде при 10-20 °С до тех пор, пока разница в размерах образца при измерении их с интервалом в 3 сут. окажется менее 0,1 мм. По новым размерам образца, измеренным таким же образом, как и до увлажнения, определяют  $V_{max}$ , м<sup>3</sup>. Затем образцы высушивают до постоянной массы с соблюдением требований, изложенных при описании способа определения влажности. Образцы в абсолютно сухом состоянии взвешивают с погрешностью до 0,01 г и записывают массу  $m_0$ , кг. Немедленно вслед за взвешиванием образцов измеряют их размеры и вычисляют объем  $V_0$ , м<sup>3</sup>.

По полученным в процессе испытаний значениям  $m_w$  и  $V_w$ , используя формулу (29) вычисляют плотность  $\rho_w$ , округляя результат до 5 кг/м<sup>3</sup>. Влажность  $W$  определяют по  $m_w$  и  $m_0$ , используя формулу(4) с погрешностью до 1 %.

Плотность абсолютно сухой древесины, парциальную и базисную плотность вычисляют, используя соответственно формулы (26), (34), (38) по найденным значениям  $m_0$ ,  $V_0$ ,  $V_w$  и  $V_{max}$ .

Кроме описанного метода определения плотности древесины на образцах в форме прямоугольной призмы можно определять плотность на образцах произвольной формы, используя для измерения объема образца ртутные объемомеры. Эти приборы основаны на измерении объема вытесненной из цилиндра ртути (несмачивающей древесину жидкости) при погружении в нее образца [63].

Базисную плотность древесины по сырьим образцам неправильной формы (стружка, щепа и т.д., цилиндрические пробы из древесины растущего дерева) можно определить, измеряя их объем следующим способом [50]. Образец погружают в воду и с помощью весов измеряют усилие, препятствующее его всплытию. Принимая плотность воды за единицу, определяют объем образца, численно равный измеренной выталкивающей силе.

Поскольку плотность древесины существенно зависит от ее влажности, в справочниках приводятся значения плотности при нормализованной (стандартной) влажности. Раньше у нас стандартной влажностью принято было считать 15 %. Однако теперь показатели физико-механических свойств древесины определяются при влажности 12 % или пересчитываются на эту новую стандартную влажность.

Величина плотности древесины, кг/м<sup>3</sup>, в зависимости от породы изменяется в очень широких пределах: древесину с очень малой плотностью имеет пихта сибирская из Восточной Сибири (345), ива белая (415) и др., а наиболее плотную – самшит (960), береза железная (970), саксаул (1040), ядро фисташки (1100).

По плотности древесины при 12 % влажности породы можно разделить на три группы: а) породы с малой плотностью (плотность 540 и менее): из хвойных – сосна, ель (все виды), пихта (все виды), кедр (все виды), можжевельник обыкновенный; из лиственных – тополь (все виды), липа (все виды), ива (все виды), осина, ольха черная и белая, каштан посевной, орех белый, серый и маньчжурский; б) породы средней плотности (плотность 550–740): из хвойных – лиственница (все виды), тис; из лиственных – береза повислая, пушистая, желтая и черная; бук восточный и европейский, вяз, груша, дуб летний, восточный, болотный, монгольский; ильм, карагач, клен (все виды), лещина, орех греческий, платан, рябина, хурма, яблоня, ясень обыкновенный и маньчжурский; в) породы высокой плотности (плотность 750 и выше): акация белая и песчаная, береза железная, глидичия каспийская, глоговина, гикори белый, граб, дзелька, дуб каштанолистный и араксинский, железное дерево, земляничное дерево, кизил, маклюра, саксаул белый, самшит, фисташка, хмелеграб.

Среди иноземных пород имеются такие, древесина которых имеет как очень малую плотность (бальза – плотность 120), так и очень высокую плотность (бакаут – плотность 1300).

Средние значения плотности древесины при нормализованной влажности  $\rho_{12}$ , абсолютно сухой древесины  $\rho_0$  и базисной плотности  $\rho_b$  для наиболее распространенных пород приведены в табл. 19.

В РТМ [26] и таблицах ССД\* имеются более подробные сведения о плотности древесины с указанием вида древесной породы и района ее произрастания.

19. Средние значения плотности древесины

Порода	Плотность, кг/м <sup>3</sup>		Базисная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Порода	Плотность, кг/м <sup>3</sup>		Базисная плотность, кг/м <sup>3</sup>
	$\rho_{12}$	$\rho_0$			$\rho_{12}$	$\rho_0$	
Лиственница	665	635	540	Ясень обыкновенный	680	650	560
Сосна обыкновенная	505	480	415	Бук	680	650	560
Ель	445	420	365	Вяз	650	620	535
Кедр (сосна кедровая)	435	405	360	Береза	640	620	520
Пихта сибирская	375	350	310	Орех греческий	590	560	490
Граб	795	760	640	Ольха	525	495	430
Акация белая	800	770	650	Осина	495	465	400
Груша	710	670	585	Липа	495	470	410
Дуб	690	655	570	Тополь	455	425	375
Клен	690	655	570	Ива	455	425	380

\* Таблицы стандартных справочных данных "Древесина. Показатели физико-механических свойств малых образцов без пороков".

Следует учитывать, что приводимые в таблицах данные представляют собой средние показатели, вычисленные по сильно изменчивым величинам. Для оценки пределов их колебаний необходимо пользоваться статистическими характеристиками, приведенными в РТМ и таблицах ССД.

По плотности древесины при нормализованной влажности  $\rho_{12}$  можно определить другие показатели плотности, применяя формулы, приведенные в табл. 20. Для вывода этих формул были использованы соотношения (30), (31), (35), (41), (42). При этом все породы были разбиты на две группы: в первую отнесены породы, коэффициент объемного разбухания которых (с округлением) равен 0,6 %, во вторую – породы с коэффициентом объемного разбухания 0,5 % на 1 % влажности древесины.

#### 20. Формулы для определения различных показателей плотности древесины по ее плотности при нормализованной влажности $\rho_{12}$

Показатели	Формулы для пород с коэффициентом разбухания древесины $K_\alpha$ , % на 1 % влажности	
	$K_\alpha = 0,6$ (белая акация, береза, бук, граб, лиственница)	$K_\alpha = 0,5$ (остальные породы)
Плотность абсолютно сухой древесины	$\rho_0 = 0,957\rho_{12}$ (43)	$\rho_0 = 0,946\rho_{12}$ (44)
Базисная плотность древесины	$\rho_b = 0,811\rho_{12}$ (45)	$\rho_b = 0,823\rho_{12}$ (46)
Парциальная плотность древесины при влажности $W < 30\%$	$\rho'_w = 0,957\rho_{12} \times \frac{100}{100 + 0,6W}$ (47)	$\rho'_w = 0,946\rho_{12} \times \frac{100}{100 + 0,5W}$ (48)
Плотность древесины при влажности $W = 15\%$	$\rho_{15} = 1,010\rho_{12}$ (49)	$\rho_{15} = 1,012\rho_{12}$ (50)
Плотность древесины при влажности $W = 0 - 30\%$	$\rho_w = 0,957\rho_{12} \times \frac{100 + W}{100 + 0,6W}$ (51)	$\rho_w = 0,946\rho_{12} \times \frac{100 + W}{100 + 0,5W}$ (52)
Плотность древесины при влажности $W > 30\%$	$\rho_w = 0,811\rho_{12} \times (1 + 0,01W)$ (53)	$\rho_w = 0,823\rho_{12} \times (1 + 0,01W)$ (54)

Результаты вычислений  $\rho_0$  и  $\rho_{15}$  по формулам (43), (44), (49), (50) и известным формулам Н.Л. Леонтьева [36], выведенным из несколько упрощенной исходной зависимости между  $\rho_w$  и  $W$ , практически совпадают. Плотность  $\rho_w$  при более высокой влажности по формулам монографии [36] оказывается примерно на 2 % выше, а базисная плотность  $\rho_b$  на 2,5–4 % ниже значений, вычисленных по формулам (51)–(54) и (45), (46).

Различие в значениях базисной плотности объясняется тем, что раньше, используя формулу (39) вместо коэффициента объемной усушки  $K_b$  подставляли по существу коэффициент разбухания  $K_a$ . По этой же причине значения  $\rho_b$ , приведенные в РТМ и табл. 20, занижены на указанную выше величину.

Плотность коры исследована гораздо меньше, чем древесины; имеющиеся отрывочные данные отличаются большой пестротой. Ниже приведены результаты исследования коры трех пород, проведенных Н.Л Леонтьевым:

Порода	Сосна	Ель	Береза
Плотность коры при $W = 12\%$ , кг/м <sup>3</sup>	680	730	745
Плотность абсолютно сухой коры, кг/м <sup>3</sup>	652	715	736

Сравнение этих данных со средней плотностью древесины при влажности 12 % показывает, что плотность коры сосны на 35 %, ели – на 65 %, а березы – на 18 % больше, чем древесины. Для определения плотности коры указанных пород при других значениях влажности по аналогии с древесиной можно использовать формулы (30) и (31), подставив в них коэффициенты объемного разбухания коры.

Плотность луба значительно выше, чем плотность корки. Об этом свидетельствуют данные А.Б. Большакова о плотности составных частей коры в абсолютно сухом состоянии для трех пород, кг/м<sup>3</sup>:

Порода	Сосна	Ель	Береза
Луб	808	929	847
Корка	296	638	524

### § 13. Проницаемость древесины жидкостями и газами

Проницаемость характеризует способность древесины пропускать жидкости или газы под давлением. При испытаниях обычно используют из жидкостей воду, а из газов – воздух или азот.

Водопроницаемость древесины вдоль волокон значительно выше, чем поперек; при этом у древесины лиственных пород она в несколько раз больше, чем у хвойных. Заболонь имеет намного большую водопроницаемость, чем ядро (спелая древесина), которое у некоторых пород вообще не пропускает воду.

Вода в древесине движется по системе капилляров, включающей в себя полости клеток, отверстия в мембранных порах и субмикроскопические каналы в клеточных стенках. У сухой древесины в ядре и в заболони клетки имеют в основном закрытые поры, у которых торус прижат к окаймлениям.

На проницаемость влияет содержание и характер распределения в ядре смолистых и других экстрактивных веществ, затрудняющих или во все исключающих возможность перемещения воды по микрокапиллярам в мембранных пор и клеточных стенках. Удаление этих веществ путем их экстракции спиртобензolem повышает проницаемость ядра, особенно сильно у сосны и кедра, меньше – у ели и лиственницы. У пихты проницаемость существенно увеличивается после обработки древесины метанолом или ацетоном. Поздняя древесина годичных слоев у сосны, ели (кроме заболоченных), пихты более водопроницаема, чем ранняя древесина [71]. Существенное влияние на проницаемость поперек волокон оказывают сердцевинные лучи. Роль лучевых трахеид показана в работе [29].

Определение водопроницаемости проводят по стандартному методу, разработанному В.А. Баженовым. Согласно ГОСТ 16483.15-72 для испытаний применяют прибор, устройство которого показано на рис. 35. Образец в виде цилиндра диаметром 47 мм и высотой 20 мм, ориентированный вдоль волокон, или в радиальном, или тангенциальном направлении попереck волокон, влагозолирируют по боковой поверхности. Образец 10 вкладывают между двумя кольцевыми резиновыми прокладками 9 в корпус прибора. В корпус запрессованы два подшипника 7, исключающие деформацию прокладок при навинчивании верхней части корпуса 6 и зажиме образца. Затем в полость над образцом наливают дистиллированную воду, укрепляют стеклянную трубку 1 и доливают необходимое количество воды, а сверху тонкий слой масла, предотвращающий испарение воды во время опыта. Высота столба воды в трубке должна быть  $100 \pm 3$  см.

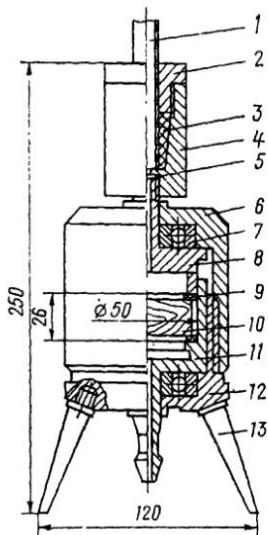


Рис. 35. Прибор для определения водопроницаемости древесины:

1 – стеклянная трубка; 2 – пробка сальника; 3 – трубка; 4 – корпус сальника; 5 – прокладка; 6 – верхняя часть корпуса; 7 – подшипник; 8 – верхний зажим; 9 – кольцевая прокладка; 10 – образец; 11 – нижний зажим; 12 – нижняя часть корпуса; 13 – ножка

Количество воды, поглощенное древесиной и прошедшее через образец, определяют по перемещению мениска в градуированной (цена деления  $0,2 \text{ см}^3$ ) трубке 1 на границе вода – масло. После каждого измерения в трубку доливают воду до первоначальной отметки. Испытания продолжают до тех пор, пока не установится постоянный суточный расход воды. По окончании опыта определяют влажность образца. Основные

показатели водопроницаемости – количество воды, см<sup>3</sup>, прошедшее через образец в 1 сут. при установившемся состоянии, и максимальная влажность образца. Кроме того, строят график зависимости расхода воды от времени выдержки.

**Газопроницаемость** древесины. Наибольшая проницаемость обнаруживается при движении газов вдоль волокон, она в десятки раз больше, чем поперек волокон. При этом проницаемость древесины сосны для газов в радиальном направлении больше, чем в тангенциальном в 2–5 раз, ели – в 10 раз [по 49].

Изучение воздухопроницаемости древесины поперек волокон по ныне стандартизованной методике провел В.А. Баженов. Был использован несколько переоборудованный прибор для испытания древесины на водопроницаемость (рис.35). Вместо стеклянной трубки была укреплена насадка с манометром, в которую нагнетался воздух. Через отверстие в дне корпуса присоединялся газометр. Воздухопроницаемость древесины определялась количеством воздуха, см<sup>3</sup>, прошедшего через 1 см<sup>2</sup> поверхности образца в 1 сек. Результаты некоторых опытов приведены в табл.21

### 21. Воздухопроницаемость древесины

Порода, зона древесины	Направление	Толщина, мм	Воздухопроницаемостью, см <sup>3</sup> /(см <sup>2</sup> ·с), при давлении, МПа			
			0,1	0,2	0,3	0,4
Сосна, заболонь	Радиальное	13,9	0,0562	0,1190	0,1600	0,2390
Сосна, ядро	Радиальное	14,2	0,0026	0,0061	0,0100	0,0138
Сосна, ядро	Тангенциальное	14,1	0,0039	0,0061	0,0153	0,0250
Дуб, ядро	Радиальное	3,5	0,00013	0,00026	0,00045	0,00067
Дуб, ядро	Тангенциальное	3,4	0,00071	0,00130	0,00287	0,00478
Бук	Тангенциальное	15,0	0,0150	0,0390	0,0670	0,0870

Как видно из таблицы, ядро сосны имеет весьма незначительную воздухопроницаемость; она по крайней мере в 10–15 раз меньше, чем у заболони. У ядровой древесины дуба проницаемость меньше в радиальном и больше в тангенциальном направлении лишь в тонких образцах.

Согласно ГОСТ 16483.34-77 в качестве показателя, характеризующего способность древесины проводить газы, рекомендуется использовать коэффициент газопроницаемости  $K_r$ , м<sup>2</sup>/(с·МПа), вычисляемый по формуле

$$K_r = \frac{vh}{P}, \quad (55)$$

где  $v$  – газопроницаемость, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $P$  – манометрическое давление, МПа;  $h$  – высота образца, м.

Проницаемость древесины азотом в радиальном направлении была исследована [71] у хвойных пород Сибири. Наибольшие значения  $K_r$  были обнаружены у заболони сосны: примерно половина испытанных образцов

имела  $K_r = 2,22 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{МПа})$ , а другая половина –  $4,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{МПа})$ . Несколько меньший коэффициент газопроницаемости у кедра и лиственницы и весьма малый у ели. У пихты заболонь оказалась почти совсем непроницаемой для азота. У всех пород (кроме пихты) проницаемость заболони намного выше, чем ядра (спелой древесины). Наименьшая проницаемость ядра у лиственницы, у пихты несколько выше (и даже больше, чем для заболони), далее следуют ель, кедр и сосна.

Испытания древесины на газопроницаемость требуют значительно меньше времени, чем испытания проницаемости жидкостями. Между указанными свойствами наблюдается тесная корреляция и определение газопроницаемости используют для оценки способности древесины пропитываться растворами антисептиков и антиприренов, варочными растворами при получении целлюлозы и т. д.

### § 14. Тепловые свойства древесины

К теплофизическим свойствам древесины относятся теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность и тепловое расширение.

Известно, что теплоемкость материала характеризует его способность аккумулировать тепло. Показателем этого свойства является удельная теплоемкость  $c$ , представляющая собой количество теплоты, необходимое для того, чтобы нагреть 1 кг массы материала на 1 К (или на 1 °C). Удельная теплоемкость измеряется в кДж/(кг·°C).

Процессы распространения (переноса) тепла в материале характеризуются – коэффициентами теплопроводности и температуропроводности. Первый из них входит в уравнение стационарного теплообмена

$$Q = \lambda F \tau \left( \frac{\Delta t}{\Delta x} \right), \quad (56)$$

устанавливающее связь между количеством теплоты  $Q$ , распространяющейся внутри тела, и площадью сечения  $F$ , перпендикулярного тепловому потоку, временем  $\tau$ , перепадом температур  $\Delta t$  на двух изотермических поверхностях, а также расстоянием между ними  $\Delta x$ . Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  численно равен количеству теплоты, проходящей в единицу времени через стенку из данного материала площадью 1 м<sup>2</sup> и толщиной 1 м при разности температур на противоположных сторонах стенки в 1 °C. Коэффициент теплопроводности измеряется в Вт/(м·°C). При стационарном теплообмене температурное поле в материале остается постоянным во времени.

Второй из указанных выше показателей, характеризует скорость изменения температуры материала при нестационарном теплообмене (нагревании или охлаждении). Коэффициент температуропроводности  $a$  определяет инерционность материала, т. е. его способность вы-

равнивать температуру. Показатель  $a$ , м<sup>2</sup>/с, численно равен отношению коэффициента теплопроводности к теплоемкости единицы объема материала:

$$a = \frac{\lambda}{cp}, \quad (57)$$

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

Экспериментально удельную теплоемкость материала определяют калориметрами. Также прямым методом можно установить коэффициент теплопроводности при стационарном потоке тепла. Однако для древесины, особенно влажной, более удобны нестационарные методы. Один из таких методов, основанный на использовании "мгновенного" источника тепла, достаточно подробно описан в учебном пособии [63].

**Теплоемкость древесины.** Сухая древесина представляет собой двухфазную систему, включающую в себя древесинное вещество и воздух. Однако доля воздуха (по массе) в древесине крайне мала, и теплоемкость сухой древесины практически равна теплоемкости древесинного вещества.

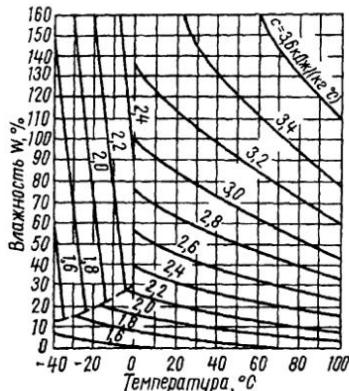
Поскольку состав древесинного вещества у всех пород одинаков, удельная теплоемкость древесины не зависит от породы и по современным данным [76] при 0 °С для абсолютно сухой древесины равна 1,55 кДж/кг·°С. С повышением температуры удельная теплоемкость древесины несколько возрастает по линейному закону и при 100 °С увеличивается примерно на 25 %.

Значительно сильнее влияет на теплоемкость увлажнение древесины. Например, увеличение влажности древесины от 0 до 130 % приводит к повышению теплоемкости примерно в 2 раза.

Одновременное влияние температуры и влажности на теплоемкость древесины можно проследить по диаграмме (рис. 36), построенной П.С. Серговским по данным К.Р. Кантера. На этой же диаграмме представлены значения теплоемкости при отрицательных температурах. Замораживание сырой древесины приводит к уменьшению теплоемкости, так как лед имеет вдвое меньшую теплоемкость, чем вода.

Рис. 36. Диаграмма удельной теплоемкости древесины

Однако главным фактором, влияющим на теплоемкость мерзлой древесины, является не влажность, а температура [74].



**Теплопроводность древесины.** На способность древесины проводить тепло оказывает влияние ее плотность.

На рис. 37 показан график зависимости между коэффициентом теплопроводности древесины поперек волокон  $\lambda_{\perp}$  и ее плотностью в абсолютно сухом состоянии  $\rho_0$ , построенный автором по данным отечественных и зарубежных исследователей.

Нижний экстраполированный участок кривой отсекает на оси ординат отрезок, равный величине теплопроводности воздуха – 0,0253 Вт/(м·°C); верхний участок кривой, продолженный до плотности  $\rho_0 = 1530 \text{ кг}/\text{м}^3$ , дает возможность ориентировочно оценить теплопроводность древесинного вещества  $\lambda_{\text{древ}}\perp$ . Как видим, этот показатель оказывается равным примерно 0,5 Вт/(м·°C). Точные данные о теплопроводности древесинного вещества отсутствуют.

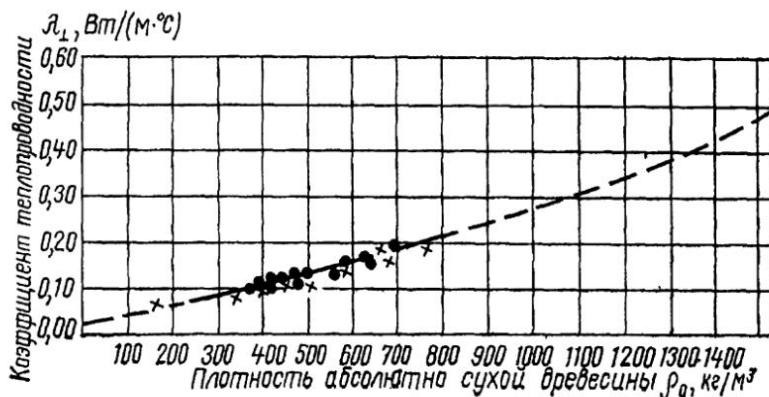


Рис. 37. Зависимость теплопроводности древесины поперек волокон от плотности в абсолютно сухом состоянии

В.П. Ловецкий (СибТИ) рассчитал коэффициент теплопроводности древесинного вещества, рассматривая древесину как набор пустотелых стержней прямоугольного сечения и используя экспериментальные данные о теплопроводности древесины березы. Подставляя в формулу В.П. Ловецкого вместо  $\rho_0$  величину  $\rho_0$  для березы получаем  $\lambda_{\text{древ}}\perp$ , равную 0,48; для сосны в тангенциальном направлении – 0,53, т. е. показатели, близкие к 0,5 Вт/(м·°C).

Увеличение плотности сухой древесины, т. е. повышение доли, занимаемой в единице объема древесинным веществом, приводит к возрастанию теплопроводности древесины. Это объясняется тем, что древесинное вещество имеет примерно в 20 раз больший коэффициент теплопро-

водности  $\lambda_{\text{в.}\perp}$ , чем воздух. Можно рассчитать теплопроводность древесинного вещества  $\lambda_{\text{в.}\parallel}$  по теплопроводности древесины  $\lambda_{\parallel}$  вдоль волокон, полагая, что тепло передается параллельно по клеточным стенкам и воздуху, заключенному в полостях клеток. Тогда  $\lambda$  древесинного вещества оказывается для березы 0,94, а для сосны 0,87 Вт/(м·°C).

Поскольку микрофибриллы ориентированы преимущественно вдоль оси клеток, теплопроводность в этом направлении примерно в 1,5–2 раза выше, чем в поперечном направлении.

По радиальному и тангенциальному направлениям поперек волокон коэффициенты теплопроводности  $\lambda_r$  и  $\lambda_t$  могут различаться. Дело в том, что в тангенциальном направлении вытянуты зоны поздней древесины годичных слоев. Поздняя древесина, особенно у хвойных пород, более плотная, чем ранняя, и следовательно, более теплопроводная.

Расчеты [74, 76] показывают, что теплопроводность древесины в тангенциальном направлении несколько больше, чем в радиальном. Увеличению теплопроводности в радиальном направлении способствуют сердцевинные лучи с преимущественным расположением микрофибрилл вдоль длины луча. Играет роль и форма сечения анатомических элементов. Все это приводит к тому, что по экспериментальным данным многих исследователей у древесины хвойных и большинства лиственных пород практически нет разницы между  $\lambda_r$  и  $\lambda_t$ . Только у лиственных пород с большим объемом сердцевинных лучей (дуб, бук),  $\lambda_t$  больше  $\lambda_r$ , примерно на 15 %.

Увлажнение древесины, т. е. замещение содержащегося в ней воздуха водой, имеющей в 23 раза большую теплопроводность, приводит к возрастанию теплопроводности древесины. По мере заполнения полостей клеток водой скорость изменения функции  $\lambda = f(W)$  постепенно уменьшается (рис. 38).

Повышение температуры влажной древесины приводит к еще большему увеличению теплопроводности. Это можно проследить по обобщенной диаграмме (рис. 39) для древесины березы [по 54, 76]. На этом же рисунке показана диаграмма коэффициентов теплопроводности в области отрицательных температур [по 74]. Замораживание древесины влажностью выше предела насыщения клеточных стенок ведет к скачкообразному увеличению ее теплопроводности, так как коэффициент теплопроводности льда при  $t = 0$  °C в 4 раза больше, чем воды. При дальнейшем понижении температуры теплопроводность возрастает, что связано главным образом с повышением теплопроводности льда. При влажности ниже  $W_{\text{н.н}}$  фазовые превращения испытывает лишь небольшая часть связанной воды, поэтому таких скачков здесь не наблюдается.

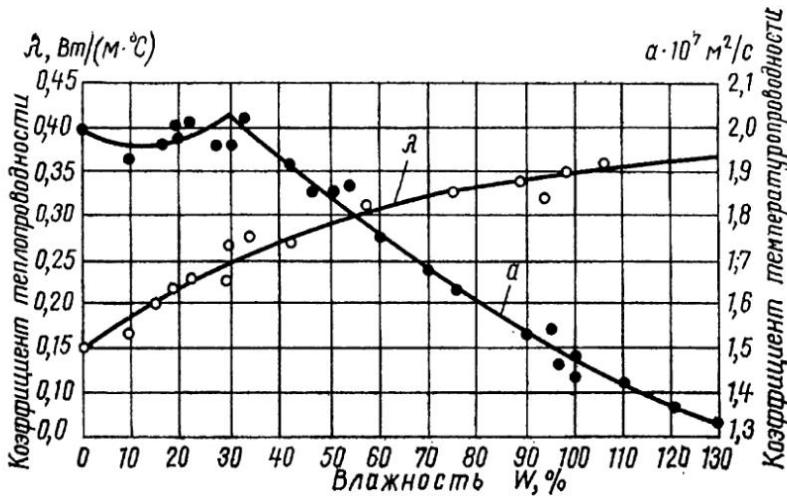


Рис. 38. Зависимость коэффициентов теплопроводности и температуропроводности древесины от влажности (по Г.С. Шубину и Э.Б. Щедриной). Сосна ( $\rho_b = 360 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), тепловой поток в радиальном направлении, температура  $t = 25^\circ\text{C}$

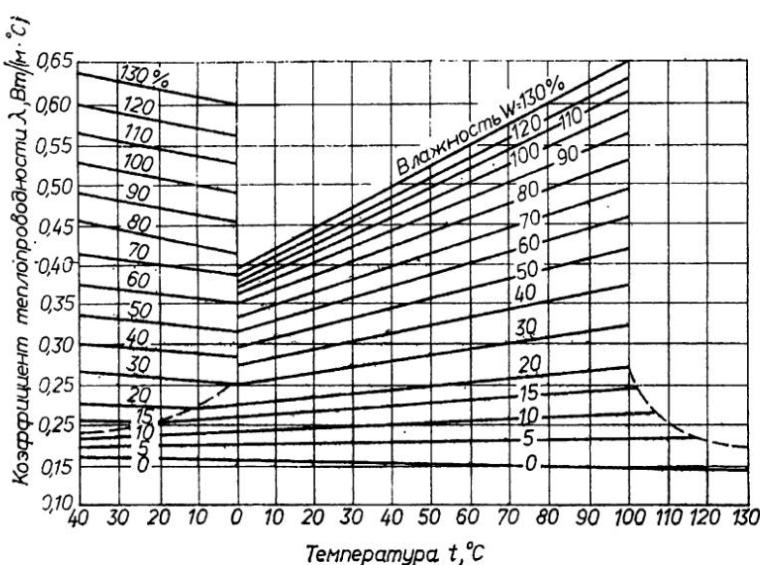


Рис. 39. Диаграмма коэффициента теплопроводности древесины березы ( $\rho_b = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), тепловой поток в радиальном направлении

Используя диаграмму на (рис. 39), можно определить, предложенным П.С. Серговским методом, теплопроводность древесины других пород. Для этого, приняв значение  $\lambda$  для березы ( $\rho_b = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) за номинальное, надо умножить его на коэффициент  $K_p$ , учитывающий плотность древесины данной породы. Ниже приведены коэффициенты  $K_p$  для разных значений базисной плотности древесины  $\rho_b$ :

$\rho_b$	350	375	400	425	450	475	525	550	575	600
$K_p$	0,80	0,84	0,87	0,90	0,93	0,97	1,05	1,11	1,20	1,28

Для учета влияния направления теплового потока надо найденные значения коэффициента теплопроводности умножить еще на  $K_x$ , равный для дуба, буква в тангенциальном направлении 0,87, а вдоль волокон 1,6. Для остальных пород учитывается только различие в теплопроводности вдоль и поперек волокон; при тепловом потоке вдоль волокон  $K_x = 2,2$ .

Значения коэффициентов  $\lambda$  у древесины сравнительно невелики, поэтому древесина относится к довольно хорошим теплоизоляционным материалам.

**Температуропроводность древесины.** Величина коэффициента температуропроводности  $a$  определяется по уравнению (57), если известны значения двух других тепловых коэффициентов  $\lambda$  и  $c$ . У абсолютно сухой древесины с уменьшением плотности  $\rho$  коэффициент температуропроводности возрастает. Это связано с увеличением в единице объема древесины доли воздуха, имеющего температуропроводность примерно в 100 раз большую, чем древесинное вещество. Влияние влажности на температуропроводность поперек волокон иллюстрирует рис. 38. Увеличение содержания свободной воды ( $W > W_{n,n}$ ) приводит к резкому падению температуропроводности, потому, что воздух в полостях клеток замещается водой, имеющей примерно в 150 раз меньший коэффициент температуропроводности.

В области ниже  $W_{n,n}$  влияние влажности на величину  $a$  практически не наблюдается. Это объясняется тем, что воздуха в клеточных стенках почти нет, и влажная клеточная стенка состоит из двух фаз – древесинного вещества и воды, коэффициенты температуропроводности которых довольно близки.

**Тепловое расширение древесины.** При нагревании твердых материалов, в том числе и древесины, происходит увеличение их объема. Коэффициент линейного теплового расширения  $\alpha'$  представляет собой изменение единицы длины тела при нагревании его на  $1^\circ\text{C}$ . Вследствие анизотропии древесины коэффициенты  $\alpha'$  по трем структурным направлениям различны. Наименьший коэффициент линейного расширения  $\alpha_{\parallel}'$  в направ-

лении вдоль волокон; величина его по данным из разных источников для сухой древесины колеблется в пределах  $(2,5-5,4) \cdot 10^{-6}$   $1/^\circ\text{C}$ . Тепловое расширение поперек волокон значительно (иногда в 10–15 раз) больше, чем вдоль волокон, причем в тангенциальном направлении оно обычно в 1,5–1,8 раза выше, чем в радиальном. Таким образом, наблюдается известная аналогия с анизотропией усушки (разбухания).

Некоторые данные о коэффициентах линейного расширения абсолютно сухой древесины приведены в табл. 22. Коэффициент линейного расширения вдоль волокон древесины составляет  $1/3 - 1/10$  коэффициентов теплового расширения металлов, бетона и стекла. При нагревании влажной древесины кроме теплового расширения поперек волокон, вызванного повышением температуры, одновременно происходит значительно большая влажностная деформация. Изменение влажности на 1 % в области ниже  $W_{n,n}$  вызывает деформацию в десятки раз большую, чем изменение температуры на  $1^\circ\text{C}$ . Таким образом, усушка и разбухание маскируют чисто температурные деформации древесины поперек волокон. Если повышается температура свежесрубленной древесины, находящейся в воде, то при первом нагреве происходит увеличение размеров в тангенциальном направлении и сокращение их в радиальном. При последующих нагреваниях наблюдается некоторое уменьшение размеров в обоих направлениях.

## 22. Коэффициенты теплового расширения сухой древесины

Порода	$\alpha'_{  } \cdot 10^6$	$\alpha'_r \cdot 10^6$	$\alpha'_t \cdot 10^6$	Источник
Сосна	4,2	15,0	29,0	В. Стивенс
Ель	2,6	29,3	50,2	Я.Н. Рудобельская (Станко)
Дуб	3,6	29,3	41,9	Медисонская лаборатория
Береза	2,5	27,2	30,0	– “ –
Бук	5,4	22,0	34,8	В. Стивенс

В табл. 23 представлены данные Я.Н. Станко (МЛТИ) о коэффициентах  $\alpha'$  для сырой и сухой древесины ели; знаки "+" и "-" показывают соответственно удлинение и укорочение.

## 23. Коэффициенты теплового расширения сырой и сухой древесины ели

Структурное направление	Коэффициенты теплового расширения древесины $\alpha' \cdot 10^6$ , $1/^\circ\text{C}$		
	сырой		сухой
	Первый нагрев	Последующие нагревы	
Радиальное	-29	-5	+28,5
Тангенциальное	+25	-5	+48,0

Причина увеличения деформации при первом нагреве, очевидно, заключается в снятии внутренних напряжений роста. В растущем дереве в тангенциальном направлении действуют сжимающие напряжения, поэтому при снятии их обнаруживается удлинение образца в этом направлении. В радиальном направлении происходит обратное явление. Удовлетворительного объяснения причин сокращения образца при последующих нагревах пока еще не найдено.

Показатели, характеризующие тепловые свойства древесины, используются для расчета процессов ее нагревания, сушки, оттаивания, замораживания, потерь тепла через ограждения из древесины.

### § 15. Электрические свойства древесины

В этой группе свойств рассматривается электропроводность, электрическая прочность, диэлектрические и пьезоэлектрические свойства древесины.

**Электропроводность.** Способность древесины проводить электрический ток находится в обратной зависимости от ее электрического сопротивления. В общем случае полное сопротивление образца древесины, размещенного между двумя электродами, определяется как результирующее двух сопротивлений – объемного и поверхностного. Объемное сопротивление численно характеризует препятствие прохождению тока сквозь толщу образца, а поверхностное сопротивление – прохождению тока по поверхности образца. Показателями электрического сопротивления служат удельное объемное и поверхностное сопротивления. Первый из названных показателей выражается в омах на сантиметр ( $\text{Ом}\cdot\text{см}$ ) и численно равен сопротивлению при прохождении тока через две противоположные грани кубика размером  $1\times 1\times 1$  см из данного материала (древесины). Второй показатель измеряется в омах и численно равен сопротивлению квадрата любого размера на поверхности образца древесины при подведении тока к электродам, ограничивающим две противоположные стороны этого квадрата. Методы измерения этих показателей для древесины стандартизованы (ГОСТ 18408–73).

Представление о порядке величин удельного объемного и поверхностного сопротивлений дают данные, приведенные в табл. 24.

Более подробные данные, полученные в Белорусском технологическом институте (БТИ), приведены в табл. 25. Здесь даны показатели для абсолютно сухой древесины вдоль и поперек волокон (в радиальном направлении) при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ .

**24. Сравнительные данные об удельном объемном и поверхностном сопротивлении древесины**

Порода и направление	Влажность, %	Удельное объемное сопротивление, Ом·см	Удельное поверхностное сопротивление, Ом	Источник
Береза, вдоль волокон	8,2	$4,2 \cdot 10^{10}$	$4,0 \cdot 10^{11}$	М.М. Михайлов
Береза, поперек волокон	8,0	$8,6 \cdot 10^{11}$	$2,8 \cdot 10^{12}$	
Бук, вдоль волокон	9,2	$1,7 \cdot 10^9$	$9,4 \cdot 10^{10}$	
Бук, поперек волокон	8,3	$1,4 \cdot 10^{10}$	$7,9 \cdot 10^{10}$	
Сосна, вдоль волокон	7,5	—	$2,1 \cdot 10^{11}$	И.Л. Туманов (МЛТИ)
Сосна, поперек волокон	7,5	$1,3 \cdot 10^{11}$	$7,9 \cdot 10^{11}$	
Ель, вдоль волокон	7,8	—	$1,0 \cdot 10^{11}$	
Ель, поперек волокон	7,8	$6,4 \cdot 10^{10}$	$4,0 \cdot 10^{11}$	
Дуб, вдоль волокон	7,9	—	$2,0 \cdot 10^{10}$	
Дуб, поперек волокон	7,9	$1,3 \cdot 10^{10}$	$5,5 \cdot 10^{10}$	

Из табл. 25 видно, что древесина относится к диэлектрикам, для которых удельное сопротивление равно  $10^8 - 10^{17}$  Ом·см. Этот показатель вдоль волокон у большинства пород в несколько раз меньше, чем поперек. Сухая древесина имеет очень малую электропроводность, примерно такую, как у лучших электроизоляционных материалов. С повышением влажности древесины ее сопротивление уменьшается.

**25. Удельное объемное сопротивление древесины в абсолютно сухом состоянии**

Порода	Удельное объемное сопротивление, Ом·см	
	поперек волокон	вдоль волокон
Сосна	$2,3 \cdot 10^{15}$	$1,8 \cdot 10^{15}$
Ель	$7,6 \cdot 10^{16}$	$3,8 \cdot 10^{16}$
Ясень	$3,3 \cdot 10^{16}$	$3,6 \cdot 10^{15}$
Граб	$8,0 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{15}$
Клен	$6,6 \cdot 10^{17}$	$3,3 \cdot 10^{17}$
Береза	$5,1 \cdot 10^{16}$	$2,3 \cdot 10^{16}$
Ольха	$1,0 \cdot 10^{17}$	$9,6 \cdot 10^{15}$
Липа	$1,5 \cdot 10^{16}$	$6,4 \cdot 10^{15}$
Осина	$1,7 \cdot 10^{16}$	$8,0 \cdot 10^{15}$

Особенно большое влияние на электропроводность оказывает связанная вода. В табл. 26 представлены данные (БТИ), иллюстрирующие влияние изменения влажности в диапазоне 0–20 % на удельное объемное сопротивление древесины поперек волокон.

### 26. Влияние влажности на объемное сопротивление древесины

Порода	Удельное объемное сопротивление, Ом·см, при влажности древесины, %		
	0	7	20
Сосна	$2,3 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^8$
Ель	$7,6 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^8$
Дуб	$1,5 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^8$
Береза	$5,1 \cdot 10^{16}$	$9 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^8$
Ольха	$1,0 \cdot 10^{17}$	$9 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^8$

Резкое падение сопротивления продолжается при повышении влажности до предела насыщения клеточных стенок. Электропроводность древесины при  $W_{n,n}$  больше электропроводности абсолютно сухой древесины в десятки миллионов раз. Дальнейшее повышение влажности за счет увеличения содержания свободной воды приводит к увеличению электропроводности лишь в десятки или сотни раз.

Поверхностное сопротивление древесины также существенно снижается с увеличением влажности. По данным МЛТИ увеличение влажности древесины бука от 4,5 до 17 % привело к снижению удельного поверхностного сопротивления вдоль волокон с  $1,2 \cdot 10^{13}$  до  $1,0 \cdot 10^7$  Ом.

Повышение температуры приводит к уменьшению объемного сопротивления древесины. Наибольшее влияние температуры заметно при сравнительно низкой влажности древесины. Так, увеличение температуры от 20 до 94 °C снижает сопротивление абсолютно сухой древесины в миллион раз, а древесины влажностью 22–24 % всего лишь в 100 раз.

При отрицательных температурах объемное сопротивление древесины возрастает. По данным ЛТА удельное объемное сопротивление вдоль волокон образцов березы влажностью 76 % при 0 °C составило  $1,2 \cdot 10^7$  Ом·см, а при охлаждении до -24 °C оно оказалось  $1,02 \cdot 10^8$  Ом·см.

Пропитка древесины минеральными антисептиками (например, хлористым цинком) уменьшает удельное сопротивление, в то время как пропитка креозотом мало отражается на электропроводности.

Электропроводность древесины имеет значение при разработке режимов ее отделки лаками в поле высокого потенциала; режимов резания древесины; методов снятия статических зарядов при шлифовании древесины и др. На зависимости величины электропроводности древесины от ее влажности основано устройство кондуктометрических влагомеров. Эти приборы дают наиболее точные показания при влажности ниже предела

насыщения клеточных стенок, т. е. в области особенно сильного влияния влажности на электропроводность.

**Электрическая прочность древесины.** Способность древесины противостоять пробою, т. е. снижению сопротивления при больших напряжениях, называется электрической прочностью. Для определения электрической прочности древесины при переменном напряжении, частотой 50 Гц разработан ГОСТ 18407-73.

Электрическую прочность  $E_{np}$ , кВ/мм, вычисляют с погрешностью до 0,01 по формуле

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \quad (58)$$

где  $U_{np}$  – эффективное пробивное напряжение, кВ;  $h$  – толщина образца в рабочей зоне, мм.

Некоторые данные об электрической прочности древесины, определенные в ЦНИИМОДе по стандартной методике, а также ранее полученные данные других исследователей, приведены в табл. 27.

27. Электрическая прочность древесины некоторых пород

Порода	Влаж- ность, %	Электрическая прочность $E_{np}$ , кВ/мм в направлении			Источник
		радиальном	тangenциаль- ном	вдоль воло- кон	
Сосна	0	5,9	7,2	1,45	В.М. Спиридонов и А.З. Хартанович (БТИ)
	33	1,4	1,5	0,76	
Ель	0	6,0	7,2	1,35	
	33	1,4	1,3	0,87	
Береза	0	9,1	7,6	1,26	С.А. Кабаков (ЦНИИМОД)
	33	1,4	1,2	0,50	
Береза	12	–	5,7	1,31	
Бук	12	–	4,4	1,32	
Сосна	10	5,9	7,7	1,68	К.М. Ханмамедов

Как видно из табл. 27 электрическая прочность абсолютно сухой древесины вдоль волокон в 4–7 раз меньше, чем поперек. С повышением влажности электрическая прочность заметно снижается, при этом уменьшается различие между  $E_{np}$  вдоль и поперек волокон. По данным БТИ прочность снижается в 2 раза при изменении влажности с 10 до 14 %. Электрическая прочность древесины по сравнению с другими твердыми изоляционными материалами невелика (у стекла  $E_{np}$  равна 30, у полистирола – 40 кВ/мм).

Для повышения электрической прочности древесину пропитывают парафином, олифой, искусственными смолами и другими веществами.

**Диэлектрические свойства древесины.** Древесина, находящаяся в переменном электрическом поле, проявляет свои диэлектрические свойства, характеризующиеся двумя показателями. Первый из них – относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  – численно равен отношению емкости конденсатора с прокладкой из древесины к емкости конденсатора с воздушным зазором между электродами. Второй показатель – тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  определяет долю подведенной мощности, которая вследствие дипольной поляризации древесины поглощается ею и превращается в тепло. При этом вектор тока опережает вектор напряжения на угол, меньший, чем  $90^\circ$ . Угол  $\delta$ , дополняющий угол сдвига фаз  $\phi$  до прямого, и называется углом диэлектрических потерь. Чем больше рассеиваемая в древесине мощность, тем больше угол  $\delta$ . Методы определения диэлектрических показателей древесины пока не стандартизованы. Применявшиеся различными исследователями методы описаны в пособии [63].

Диэлектрическая проницаемость абсолютно сухой древесины примерно в 2 раза больше, чем воздуха ( $\epsilon$  воздуха равна 1). С возрастанием плотности древесины показатель существенно увеличивается. Значительно больше влияет увлажнение древесины (рис. 40).

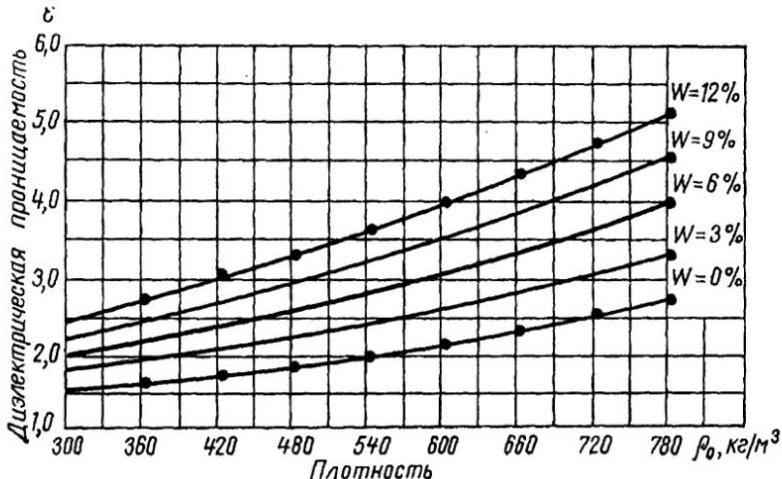


Рис. 40. Зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  древесины поперек волокон (частота  $f = 5$  МГц) от плотности  $\rho_0$  при разной влажности  $W$  (по Р. Петерсону)

Повышение частоты вызывает снижение  $\epsilon$ . По обобщенным данным Г.И. Торговникова для широкого диапазона частот ( $10-10^{11}$  Гц), включая область сверхвысоких частот (СВЧ), диэлектрическая проницаемость аб-

согласно сухой древесине поперек волокон  $\epsilon_{\perp}$  при плотности  $\rho_0 = 130 \text{ кг}/\text{м}^3$  (бальза) в среднем составила 1,3, а при  $\rho_0 = 800 \text{ кг}/\text{м}^3$  (граб) – 2,6. Вдоль волокон  $\epsilon_{\parallel}$  больше чем поперек  $\epsilon_{\perp}$  в среднем в 1,4 раза.

Напомним, что область СВЧ охватывает диапазон длин волн от 1 м до 1 мм (частота  $f = 3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$ ).

Поскольку  $\epsilon$  воды при частоте  $f = 10 - 10^{11} \text{ Гц}$  составляет 81–7,5 с увеличением влажности древесины наблюдается соответствующее повышение  $\epsilon$ . Так, для древесины плотностью  $\rho_0 = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$  при  $W = 10\%$  и  $t = 20^\circ\text{C}$  на частоте  $10^4 \text{ Гц}$  диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\perp}$  равна 4,2, на частоте  $10^{10} \text{ Гц}$  она равна 2,0, а при  $W = 60\%$  соответственно равна 65 и 6,6.

Повышение температуры от  $-40$  до  $100^\circ\text{C}$  приводит к незначительному увеличению  $\epsilon_{\perp}$  абсолютно сухой древесины (примерно в 1,3 раза) и более заметному увеличению  $\epsilon_{\perp}$  (особенно на частотах до  $10^6 \text{ Гц}$ ) влажной древесины.

Тангенс угла дизелектрических потерь древесины также зависит от ее плотности. Поскольку потери в древесинном веществе значительно больше, чем в воздухе, с увеличением плотности древесины  $\operatorname{tg} \delta$  возрастает. По данным Г.И. Торговникова  $\operatorname{tg} \delta$  древесины поперек волокон при плотности  $\rho_0 = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$  и комнатной температуре в диапазоне частот  $10-10^5 \text{ Гц}$  составляет 0,005–0,007, а при плотности  $\rho_0 = 800 \text{ кг}/\text{м}^3$  этот показатель равен 0,007–0,025. При больших частотах также наблюдается увеличение  $\operatorname{tg} \delta$ .

Вдоль волокон  $\operatorname{tg} \delta$  выше, чем поперек волокон в среднем в 1,7 раза. С повышением влажности  $\operatorname{tg} \delta$  увеличивается (рис. 41). Зависимости этого показателя от частоты имеют сложный характер. Так, для древесины с плотностью  $\rho_0 = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$  при температуре  $20^\circ\text{C}$  и влажности  $W = 80\%$  величина  $\operatorname{tg} \delta$  при частоте  $10^3 \text{ Гц}$  достигает 74, при частоте  $10^8 \text{ Гц}$  снижается до 0,2, а в области СВЧ ( $f = 10^{10} \text{ Гц}$ ) возрастает до 0,34. Повышение

температуры абсолютно сухой древесины вызывает снижение  $\operatorname{tg} \delta$ , но в области СВЧ этот показатель возрастает. У влажной древесины ( $W = 25\%$ ) нагревание приводит к существенному возрастанию  $\operatorname{tg} \delta$ , однако в области СВЧ он меняется незначительно.

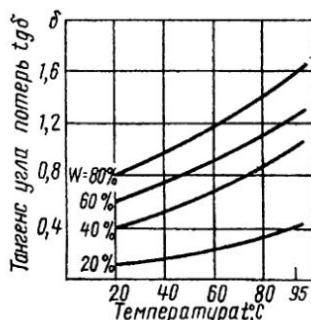


Рис. 41. Зависимость тангенса угла дизелектрических потерь древесины от температуры и влажности при частоте  $f = 3 \text{ МГц}$  (по А.А. Горяеву)

При диэлектрическом нагреве температура повышается одновременно по всему объему древесины. Такой способ нагрева можно использовать в процессах ее сушки, склеивания, пропитки и др. В последнее время находит применение микроволновая сушка древесины в поле СВЧ. При расчете установок для диэлектрического нагрева используют формулу, в которую входит в качестве параметра, характеризующего свойства нагреваемого материала, показатель  $K = \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ , называемый фактором, или коэффициентом потерь. Величину  $K$  можно определить на основании калориметрического измерения поглощаемой мощности. Этот показатель увеличивается с повышением влажности и температуры древесины.

**Пьезоэлектрические свойства древесины.** На поверхности некоторых диэлектриков под действием механических напряжений появляются электрические заряды. Это явление, связанное с поляризацией диэлектрика, носит название прямого пьезоэлектрического эффекта. Пьезоэлектрические свойства были вначале обнаружены у кристаллов кварца, турмалина, сегнетовой соли и др. Эти материалы обладают также обратным пьезоэлектрическим эффектом, заключающимся в том, что размеры их изменяются под действием электрического поля. Пластиинки из этих кристаллов находят широкое применение в качестве излучателей и приемников в ультразвуковой технике.

Исследования В.А. Баженова показали, что такими свойствами обладает и древесина, содержащая ориентированный компонент – целлюлозу. Наибольший пьезоэлектрический эффект наблюдается при сжимающей и растягивающей нагрузках под углом 45° к волокнам. Механические напряжения, направленные строго вдоль или поперек волокон пьезоэлектрического эффекта не вызывают.

Максимальный пьезоэлектрический эффект наблюдается в сухой древесине, с увеличением влажности он уменьшается и уже при влажности 6–8 % почти совсем исчезает. С повышением температуры до 100 °C его показатели увеличиваются. Чем выше модуль упругости древесины, тем меньше пьезоэлектрический эффект.

Открытое явление позволяет глубже изучить тонкую структуру древесины. Показатели пьезоэлектрического эффекта могут служить количественными характеристиками ориентации целлюлозы и поэтому очень важны для изучения анизотропии натуральной древесины и древесных материалов. Это явление используется при разработке неразрушающих методов контроля качества древесины.

### § 16. Звуковые свойства древесины

В эту группу входят свойства, определяющие способность древесины проводить, поглощать и отражать звук, а также ее резонансные свойства.

**Распространение звука в древесине.** Звук, как известно, представляет собой механические волновые колебания, распространяющиеся в упругих средах. Особенности распространения звуковых колебаний зависят от физических свойств среды и характеризуются рядом показателей.

Скорость распространения звука  $C$ , м/с, в достаточно длинном стержне в направлении колебательного движения частиц материала (продольные волны) определяется из соотношения

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (59)$$

где  $E$  – динамический модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость распространения звука, м/с, в древесине можно установить по резонансной частоте вынужденных продольных колебаний образца согласно уравнению

$$C = 2l f_0, \quad (60)$$

где  $l$  – длина образца, м;  $f_0$  – резонансная частота, Гц.

Этот показатель можно также определить импульсным ультразвуковым методом. Для этого измеряют время  $\tau$ , с, распространения упругой продольной волны по длине образца  $l$ , м, и вычисляют  $C$ , м/с, по формуле

$$C = \frac{l}{\tau}. \quad (61)$$

Средние значения скорости распространения звука при продольных колебаниях, по данным МЛТИ и ЦНИИМОД, для комнатно-сухой древесины некоторых пород приведены ниже:

Порода	Лиственница	Сосна	Ель	Дуб	Ясень	Береза
Скорость звука, м/с	4930	5360	5630	4720	4730	5530

В плоскости поперек волокон скорость звука примерно в 3-4 раза меньше, чем вдоль волокон, причем в радиальном направлении она несколько выше, чем в тангенциальном. С увеличением влажности и температуры древесины скорость распространения звука уменьшается. Скорость звука в других материалах составляет, м/с: в стали 5050, в свинце 1200, в каучуке 30, а в воздухе 330.

Важная характеристика древесины при оценке ее способности отражать и проводить звук – акустическое сопротивление, Па·с/м:

$$R = \rho C. \quad (62)$$

Величина этого показателя для комнатно-сухой древесины вдоль волокон указана ниже:

Порода	Лиственница	Сосна	Дуб	Ясень	Бук	Береза
$R \cdot 10^{-5}$ Па·с/м	33	28	31	30	28	29

Для сравнения укажем, что воздух имеет акустическое сопротивление 429, каучук  $3 \cdot 10^3$ , а сталь  $393 \cdot 10^5$  Па·с/м.

По мере распространения звуковых волн в материале вследствие потери энергии на внутреннее трение происходит затухание колебаний. При этом величина амплитуды уменьшается по экспоненциальному закону.

Для характеристики скорости затухания колебаний и одновременно величины внутреннего трения (вязкости) материала используют показатель  $\delta$  – логарифмический декремент колебаний, численно равный натуральному логарифму отношения двух амплитуд, отделенных друг от друга интервалом в один период.

Для определения декремента колебаний в древесине ЦНИИМОД разработал ГОСТ 16483.31-74. Схема установки, в которой использован электромагнитный способ возбуждения колебаний, показана на рис. 42. Древесина относится к диамагнетикам, т. е. веществам, имеющим отрицательную магнитную восприимчивость, которая у нее составляет  $(2,5-6) \cdot 10^{-6}$ . Поэтому для возбуждения продольных колебаний на торцы образца размерами  $20 \times 20 \times 300$  мм (последний размер вдоль волокон) наклеивают ферромагнитные пластинки.

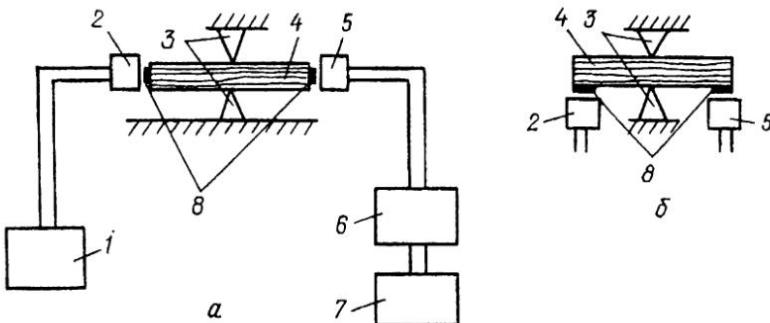


Рис. 42. Схема установки для звуковых испытаний древесины резонансным методом:  
а – схема установки для возбуждения продольных колебаний образца; б – схема расположения электромагнитных возбудителя и датчика при изгибных колебаниях образца

Образец 4 размещают на опорном устройстве, как показано на схеме рис. 42, а. При этом иглы 3 диаметром 1 мм вводят в заранее высверленные отверстия на глубину 5–6 мм. От генератора 1 электромагнитные колебания подаются на возбудитель 2 и через ферромагнитную пластинку 8 приводят образец в колебательное движение. Механические колебания образца преобразуются датчиком 5 в электрические сигналы, напряжение и частота которых измеряется милливольтметром 6 и частотомером 7.

Для возбуждения изгибных колебаний ферромагнитные пластиинки наклеивают на боковые стороны образца, а возбудитель и датчик располагают по схеме на рис. 42,б. Плавно изменяя частоту колебаний, приводят образец в состояние резонанса. Этот момент устанавливают по максимальному отклонению стрелки милливольтметра и фиксируют резонансную частоту  $f_0$ , по которой можно определить скорость распространения звука [см. формулу (60)]. Для определения декремента колебаний частоту возмущающих колебаний изменяют на величину  $\pm \Delta f$  (по обе стороны от  $f_0$ ), при которой максимальная (резонансная) амплитуда уменьшается вдвое.

Логарифмический декремент продольных и изгибных колебаний вычисляют с погрешностью не более  $0,5 \cdot 10^{-4}$  Нп<sup>\*</sup> по формуле

$$\delta = \frac{\pi(f_1 - f_2)}{\sqrt{3}f_0}, \quad (63)$$

где  $f_0$  – частота резонансных колебаний, Гц;  $f_1$  и  $f_2$  – частота колебаний с амплитудой, равной половине резонансной, Гц.

Представление о порядке величин логарифмического декремента колебания древесины дает табл. 28.

Указанные в таблице значения относятся к случаю действия возникающих при колебаниях напряжений вдоль волокон древесины. Если напряжения направлены поперек волокон, то, как показал В.В. Тулузаков на древесине ели,  $\delta$  увеличивается примерно в 4 раза.

### 28. Логарифмический декремент колебаний древесины

Порода	Влажность $W$ , %	Вид колебаний	Декремент колебаний $\delta \cdot 10^4$ Нп	Автор
Сосна	7	Изгибные	207	
Ель	7	Изгибные	222	В.Д. Никишов (МЛТИ)
Ель	8	Изгибные	173–307	И.И. Пищик (МЛТИ)
Ясень	12	Продольные	330	А.М. Боровиков и Н.Н. Дулевский
Бук	12	Продольные	366	(ЦНИИМОД)
Береза	7	Изгибные	272	В.Д. Никишов (МЛТИ)
Клен	8	Изгибные	219–377	И.И. Пищик (МЛТИ)
Тополь	12	Изгибные	288	Й. Беничак (ГНИИД, Словакия)

Величина декремента колебаний зависит от частоты. Так, по данным МЛТИ при изгибных колебаниях образцов, подвешенных в местах расположения узловых линий на двух нитях, с увеличением резонансной частоты от 0,2 до 1,5 кГц декремент изменяется незначительно; однако в диапазоне от 1,5 до 7 кГц величина этого показателя возрастает в 2–4 раза.

\* Нп — "непер" – отношение двух физических величин, натуральный логарифм которого равен единице.

Сложная зависимость декремента от влажности при комнатной температуре была установлена Ф. Кольманом и Г. Крехом [по 63]. Увлажнение древесины вначале приводит к уменьшению декремента; при влажности 6-8 % его значения достигают минимума; затем при повышении влажности до предела насыщения клеточных стенок декремент возрастает, а при дальнейшем увлажнении почти не изменяется. Увеличение температуры древесины вызывает снижение величины декремента колебаний.

Показатели, характеризующие распространение звука в древесине, используются для определения ее упругих постоянных и прочности (см. гл. 5). Ультразвуковые испытания древесины позволяют обнаруживать скрытые дефекты. Так, в свежесрубленных деревьях при положительных температурах по изменению скорости распространения ультразвука в поперечных сечениях ствола можно обнаруживать внутреннюю гниль и устанавливать ее протяженность по длине ствола. Более подробно методы и результаты ультразвуковых испытаний древесины описаны в монографии [34] и учебном пособии [63]. Ультразвуковые методы применяют также для неразрушающего контроля качества (прочности, жесткости, структурной неоднородности, шероховатости) модифицированной древесины и древесных плит.

Ультразвук повышенной интенсивности и частоты используют для обработки древесины с целью улучшения ее пропитки [89].

**Звукоизолирующая и звукопоглощающая способность древесины.** Звукоизолирующая способность древесины характеризуется ослаблением интенсивности прошедшего через нее звука. Интенсивность звука прямо связана со звуковым давлением, возникающим в газовой или жидкой среде. Величина его может изменяться в очень широких пределах, поэтому для оценки уровня звукового давления применяют логарифмическую шкалу, в которой за начало отсчета принято давление на пороге слышимости. Уровень звукового давления измеряется в относительных логарифмических единицах – децибелах. Для примера укажем, что уровень звукового давления, соответствующего обычному разговору, равен 60 дБ, уличному шуму – 70–80 дБ. При 120 дБ в слуховом аппарате человека возникают болевые ощущения.

Величина звукоизоляционной способности древесины может быть оценена по разнице уровней звукового давления перед и за перегородкой из древесины, а также по относительному уменьшению силы звука, называемому коэффициентом звукопроницаемости. Так, при толщине 3 см звукоизоляция сосновой древесины составила 12 дБ, коэффициент звукопроницаемости 0,065; для дубовой древесины при толщине 4,5 см соответственно 27 дБ и 0,002. По строительным нормам звукоизоляция стен и перегородки должна быть не ниже 40 дБ, междуэтажных перекрытий – 48 дБ. Отсюда видно, что звукоизолирующая способность массивной древесины сравнительно невысока.

Способность древесины поглощать звук вызвана рассеянием звуко-вой энергии в структурных полостях и необратимыми тепловыми потерями вследствие внутреннего трения. Для характеристики этого свойства используют коэффициент звукопоглощения, представляющий собой отношение звуковой энергии, теряемой в материале, к энергии плоской падающей волны. Коэффициент звукопоглощения сосновой перегородки толщиной 19 мм в диапазоне частот 100–4000 Гц находится в пределах 0,081–0,110.

**Резонансная способность древесины.** Древесина широко применяется для изготовления излучателей звука (дек) музыкальных инструментов. Эту древесину называют резонансной. Хотя указанное название не совсем точно отражает физическую сущность явлений, происходящих в древесине при ее использовании в музыкальных инструментах, оно широко распространено в практике и применяется в технической литературе [70].

В смычковых, щипковых и клавишных инструментах энергия колебания струны передается деке, предназначеннай для усиления звука и формирования его тембра. Значительная часть подводимой от струны к деке энергии расходуется на потери внутри материала деки, а также в местах ее закрепления на корпусе инструмента. Лишь 3–5 % общей энергии излучается в воздух в виде звука.

Качество материала, обеспечивающего наибольшее излучение звука, оценивается по предложенной акад. Н.Н. Андреевым акустической константе,  $\text{м}^4/(\text{кг}\cdot\text{с})$ :

$$K = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}, \quad (64)$$

где  $E$  – динамический модуль упругости,  $\text{Н}/\text{м}^2$  или  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}^2)$ ;  $\rho$  – плотность древесины,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Наибольшая величина акустической константы характерна для древесины ели, пихты и кедра, она составляет примерно  $12 \text{ м}^4/(\text{кг}\cdot\text{с})$ . Заготовки из резонансной древесины должны согласно ГОСТ 6900-83 удовлетворять ряду требований. Ширина годичных слоев должна быть в зависимости от вида музыкального инструмента не более 3–6 мм, а содержание поздней древесины в них не более 30 % (для дек концертных роялей не более 20 %); резонансная древесина должна быть равнослойной, не содержать сучков, пороков строения (см. ниже), особенно крени и наклона волокон.

В последнее время находит применение способ определения акустической константы по кернам – цилиндрическим образцам диаметром  $\approx 4,5$  мм, вы сверливаемым в радиальном направлении из ствола растущего дерева или кряжа. В этом случае  $K$ ,  $\text{м}^4/(\text{кг}\cdot\text{с})$ , вычисляют по формуле, вытекающей из (64) и (59)

$$K = \frac{C}{\rho}. \quad (65)$$

Скорость распространения звука в древесине  $C$  (поперек волокон) измеряют ультразвуковым методом. По данным А.А. Колесниковой (МарГТУ) показатель  $K$  примерно в 3 раза меньше стандартного.

Большое значение для качества музыкальных инструментов играет однородность материала деки. Для характеристики резонансных свойств деки как анизотропной пластинки в МЛТИ предложен показатель, также названный акустической константой. Этот показатель определяется при испытаниях на изгиб защемленной по контуру круглой пластинки, вырезанной из деки.

Следует отметить, что пока еще нет исчерпывающих объективных показателей качества древесины как материала для дек музыкальных инструментов. Акустическая константа может служить лишь приближенным критерием для первичного отбора древесины. Необходимо оценивать также потери звуковой энергии в древесине, определяемые величиной декремента колебаний  $\delta$ , а также возможные потери при креплении деки инструмента к его корпусу. Кроме того, известно, что наилучшими акустическими характеристиками обладает древесина длительной (50 лет и более) выдержки. Значения  $K$  и  $\delta$  у длительно выдержанной и невыдержанной древесины, по данным И.И. Пищика (МЛТИ), примерно одинаковы. Однако в древесине за время выдержки в течение нескольких десятков лет (старения) изменяется содержание гемицеллюлоз; такая древесина более устойчива к температурно-влажностным воздействиям, и изготовленные из нее инструменты обладают большей стабильностью звуковых характеристик.

### § 17. Свойства древесины, проявляющиеся при воздействии излучений

Различные виды излучений, представляющих собой электромагнитные колебания, образуют спектр, охватывающий огромный диапазон длин волн. Наибольшую длину имеют радиоволны (от десятков километров до миллиметров), их воздействие на древесину было частично рассмотрено в § 15. Ниже будут описаны свойства древесины, проявляющиеся при действии излучений, занимающих остальную часть спектра и обладающих длиной волны от 100 микрометров до 0,3 пикометра<sup>\*</sup>.

**Инфракрасное (ИК) излучение.** При нагревании тел происходит преобразование тепловой энергии в лучистую энергию электромагнитных колебаний. При этом нагретые тела испускают невидимые инфракрасные лучи с длинами волн от 1000 до 0,77 мкм. Принято различать три области

---

\* 1 пикометр (пм) =  $1 \cdot 10^{-12}$  м

ИК-спектра: дальняя (с длинами волн от 1000 до 50 мкм), средняя (от 50 до 2,5 мкм) и ближняя (от 2,5 до 0,77 мкм).

Способность древесины пропускать, поглощать и отражать инфракрасные лучи зависит от длины волны падающего излучения. В МЛТИ было установлено, что проницаемость древесины инфракрасными лучами с длиной волны  $\lambda = 5 - 6,5$  мкм крайне мала.

Позднее исследования [24] показали, что наибольшая отражательная способность древесины наблюдается в ближней области ИК-спектра. Максимум отражения приходится на волны длиной  $\lambda = 1,0 - 1,1$  мкм. При такой длине волны коэффициент отражения достигает 0,8. В дальней области коэффициент отражения значительно меньше и составляет 0,1 – 0,15.

Максимум проницаемости также находится в ближней области при длине волны  $\lambda = 1,0 - 1,1$  мкм. В дальней области их диапазона проницаемость постоянна. С увеличением плотности древесины проницаемость уменьшается. Через радиальные поверхности древесины проницаемость больше, чем через тангенциальные. Повышение влажности древесины приводит к увеличению проницаемости древесины для ИК-излучений.

Значительная часть энергии инфракрасных лучей поглощается поверхностью зоной (глубиной до 3–4 мм) образцов древесины. При этом наибольшее поглощение наблюдается в дальней области ИК-диапазона. При длине волн 8–15 мкм коэффициент поглощения находится в пределах 0,7–0,9.

В ближней области, в частности при  $\lambda = 1,93$  мкм, коэффициент отражения воды в десятки раз меньше, чем древесины. Поэтому повышение влажности древесины приводит к уменьшению ее отражательной способности. Это дает возможность измерять влажность поверхностных зон массивной древесины методом ИК-спектроскопии. Этот метод может быть использован для бесконтактного непрерывного измерения влажности древесных частиц в производстве древесностружечных плит. Исследования М.Д. Корсунского показали, что различия в насыпной плотности древесных частиц не оказывают влияния на результаты измерения влажности.

Поглощение инфракрасных лучей вызывает нагревание материала, что позволяет использовать инфракрасные лучи для сушки тонких сортировок (шпона, щепы, стружки), нагревания древесины при склеивании, а также для ее стерилизации. Кроме того, инфракрасное излучение используется для сушки лакокрасочных покрытий на древесине, при этом резко увеличивается скорость сушки и улучшается качество покрытия.

**Световое излучение.** Видимое световое излучение охватывает часть спектра с длинами волн 0,76–0,4 мкм и включает последовательно красные, оранжевые, желтые, зеленые, голубые, синие и фиолетовые лучи. Световые лучи обладают большей проникающей способностью, чем инфракрасные, и могут быть использованы для обнаружения скрытых дефектов внутри древесины или изделий из нее. Например, перемещая лист фа-

неры толщиной до 3 мм по столу над прорезью, освещенной сильным источником света (мощной лампой с рефлектором), можно обнаружить швы, сучки и трещины во внутреннем слое, а также дефекты склеивания. Если использовать чувствительную приемную аппаратуру, то, по данным ЛТА, можно зафиксировать лучи света, прошедшие через образцы древесины осины, сосны, ели толщиной до 35 мм, а березы – до 15 мм.

Как уже отмечалось ранее, при падении пучка световых лучей на поверхность древесины часть энергии отражается. Измеряя интенсивность отраженного светового потока, можно судить о древесной породе, качестве поверхности и наличии пороков, изменяющих окраску древесины. Важное преимущество световой дефектоскопии – полная безопасность для обслуживающего персонала.

В последнее время в связи с созданием лазеров – источников света (монохроматического когерентного излучения) высокой направленности и большой плотности успешно развивается лазерная технология, которая находит применение в деревообработке.

При воздействии лазерного излучения происходит переход электромагнитной энергии в тепловую, что позволяет использовать лазеры в качестве своеобразного режущего инструмента. По данным Т. Ореха и К. Клескеновой (ГНИИД, Словакия), полученным при использовании газового ( $\text{CO}_2$ ) лазера, ширина "реза" зависит от выходной мощности. Так, при обработке образцов ели толщиной 25 мм ширина "реза" при мощности 150 Вт составила 0,75 мм, а при мощности 340 Вт достигла 0,9 мм. Лазерное "резание" вызывает по существу сублимацию древесины [89] и сопровождается обугливанием или потемнением поверхностных зон обрабатываемого материала. Этот способ обработки может быть использован для фигурного раскюя листовых древесных материалов, резьбы, граверных работ и т. п.

**Ультрафиолетовое излучение.** Эти лучи имеют длины волн от 0,38 мкм до 10 нм<sup>\*</sup>. Ультрафиолетовое излучение вызывает свечение – люминесценцию некоторых веществ. Каждое люминесцентное вещество дает излучение определенного спектрального состава. Свечение, которое исчезает сразу же после прекращения облучения объекта, называется флуоресценцией.

Из 150 исследованных в ЛТА древесных пород флуоресценция была обнаружена у подавляющего большинства их (90 %). Чаще всего облученная древесина светится фиолетовым цветом (40 % исследованных пород), синим или голубым цветом светятся 25 % пород, темно-фиолетовый цвет имеет свечение 15 % пород и реже всего наблюдается желтое и зелено-желтое свечение (10 %).

\* Когерентность – согласованное протекание во времени нескольких волновых процессов.

\*\* 1 нанометр (нм) =  $10^{-9}$  м = 10 Å.

Дальнейшее изучение люминесценции древесины было проведено Б.К. Лакатошем [34].

Некоторые результаты этих исследований приведены в табл. 29

### 29. Характеристика цвета и интенсивности флуоресценции древесины

Порода	Цветовой тон (длина волны), нм	Чистота, %	Интенсивность (коэффициент яркости), %
Ель	479	6,5	15,5
Сосна	495	5,4	17
Пихта	536	3	12
Лиственница	557	4,5	12
Дуб, ядро	532	3,5	27
Береза	505	2,7	24
Осина	484	7	25

Цвет и интенсивность свечения зависят не только от породы, но и от состояния древесины (степени загнивания, влажности и температуры, шероховатости и т. д.). Все это позволяет использовать люминесценцию в качестве средства для обнаружения пороков древесины, контроля качества обработки и т. д.

**Рентгеновское излучение.** Рентгеновское излучение охватывает часть спектра электромагнитных волн с длиной примерно от 5 нм до 0,6 пм. Рентгеновские лучи, проходя через исследуемый объект, по-разному поглощаются отдельными его участками. Чем выше плотность участка, тем меньше интенсивность прошедших через него лучей. Располагая по ходу лучей за исследуемым объектом светящийся экран, можно наблюдать на нем внутренние дефекты объекта (пустоты, включения и т. п.).

Рентгеновскими лучами могут быть просвечены крупные круглые сортименты (диаметром 40–50 см); эти лучи позволяют также просвечивать стволы растущих деревьев при помощи передвижных установок.

Используя рентгеновские лучи, можно обнаружить в древесине ряд скрытых пороков – заросшие сучки, ходы насекомых, внутренние трещины, гнили, пустоты, а также металлические включения.

Повышение влажности снижает проницаемость древесины рентгеновскими лучами. Это свойство может быть использовано для определения величины и характера распределения влажности по сечению сортимента в процессе сушки. Рентгеновские лучи применяются также для изучения плотности древесины и тонкого строения клеточной стенки.

**Ионизирующие излучения.** Ионизирующие (ядерные) излучения возникают при распаде радиоактивных веществ, делении атомов тяжелых ядер, ядерных реакциях. Различают следующие виды ядерных излучений: потоки заряженных частиц, электромагнитное излучение и потоки незаря-

женных частиц (нейтронов). Источники первых двух видов излучений – радиоактивные вещества. Эти излучения называются радиоактивными. Источниками нейтронных излучений служат ядерные реакторы, различные ускорители элементарных частиц; препараты, содержащие смеси радиоактивных веществ с веществами, испускающими нейтроны.

Лучше пока исследовано воздействие на древесину радиоактивных излучений. Альфа-лучи плохо проникают в древесину; большая проникающая способность у бета-лучей и еще лучшая – у гамма-лучей.

Возможность применения бета-излучений для изучения свойств древесины была исследована в УЛТИ. Источниками излучения служили изотопы – стронций-90 и рутений-106. Было установлено уменьшение проницаемости бета-лучей с увеличением плотности древесины (однако у березы проницаемость оказалась меньше, чем у дуба). Наблюдалось увеличение поглощения бета-лучей с повышением влажности древесины и увеличением размеров (толщины) объекта. В ЦНИИМОДе, используя бета-излучение средней жесткости (источник – стронций-90 и иттрий-90), по ослаблению интенсивности прошедшего через объект излучения определяли влажность древесины в процессе ее сушки.

Исследования проницаемости древесины сосны, ели, дуба, бук, березы гамма-лучами были проведены [34] на установке с препаратом кобальт-60. Было установлено, что наиболее легко гамма-лучи проникают в направлении вдоль волокон (особенно у дуба). С увеличением плотности древесины поглощение энергии увеличивается; зависимость между этими факторами линейная. Наибольший коэффициент пропорциональности характерен для равнотолстой древесины бук. С повышением влажности количество поглощаемой энергии резко возрастает; оно прямо пропорционально толщине облучаемого материала.

Гамма-лучи применяют для измерения плотности древесины; они могут быть использованы для определения ее влажности, а также для контроля размеров деталей бесконтактным способом в непрерывном производственном потоке.

Имеются перспективы для применения гамма-лучей в качестве средства обнаружения скрытых дефектов древесины. Наиболее подходящим для обнаружения гнилей является мягкое гамма-излучение тулия-170. Институтом электронной интроскопии (г. Томск) совместно с Институтом леса и древесины им. В.Н. Сукачева (г. Красноярск) был разработан гамма-дефектоскоп для круглых лесоматериалов [30].

## ГЛАВА 5. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ

### § 18. Общие сведения о механических свойствах древесины

Принято различать следующие свойства древесины, проявляющиеся под действием механических нагрузок: прочность – способность сопротивляться разрушению; деформативность – способность сопротивляться изменению размеров и формы; технологические и эксплуатационные механические свойства.

Механические свойства древесины могут проявляться при действии статических (плавно возрастающих), ударных (действующих внезапно полной величиной), вращательных (попеременно изменяющих величину и направление) и долговременных (действующих весьма продолжительное время) нагрузок.

Показатели механических свойств древесины определяют обычно при растяжении, сжатии, изгибе и сдвиге (реже при кручении). Поскольку древесина – анизотропный материал ее испытывают в разных направлениях: вдоль или поперек волокон (в радиальном или тангенциальном направлении).

В древесине, как в любом другом материале, под действием внешних нагрузок возникают силы сопротивления. Эти силы, приходящиеся на единицу площади сечения тела, называются напряжением и выражаются в Н/мм<sup>2</sup> или МПа\*. Изменение размеров и формы тела под действием нагрузок называется деформацией. Напряжения и деформации могут возникать в теле и без участия внешних нагрузок вследствие неоднородных изменений его объема при сушке, увлажнении, нагревании и т. д. (см. § 11, 14). Напряжения, действующие по нормали (перпендикуляру) к сечению тела, называются нормальными и обозначаются буквой σ (сигма). Напряжения, действующие в плоскости сечения, называются касательными и обозначаются буквой τ (тау). Максимальное напряжение, предшествующее разрушению тела называют пределом прочности.

При установлении параметров технологических процессов механической и гидротермической обработки древесины, расчете элементов деревянных конструкций и в других случаях необходимо аналитическое определение напряженного и деформированного состояния древесины. Многие конкретные задачи могут быть решены методами теории упругости и сопротивления материалов, основанными на допущении, что материал, воспринимающий усилия, наделен свойствами идеально упругого тела. Для

---

\* 1 МПа = 10<sup>6</sup> Па = 10<sup>6</sup> Н/м<sup>2</sup> = 1 Н/мм<sup>2</sup>

такого материала характерна способность практически мгновенно (со скоростью звука) деформироваться приложении нагрузки и столь же быстро и полностью восстанавливать размеры и форму после снятия нагрузки. Зависимость между напряжениями и деформациями (относительными удлинениями – укорочениями или сдвигом) идеально упругого тела линейная и выражается законом Гука. Более общие и строгие решения получают на основе теории упругости; частные и в значительной мере приближенные, но, как правило, достаточные для большинства инженерных расчетов – методами сопротивления материалов.

Физическая зависимость, на которой основана теория упругости, называется обобщенным законом Гука. Она представляет собой систему уравнений, в которые входят составляющие деформаций и напряжений, действующих на трех взаимно перпендикулярных площадках (компоненты тензоров деформаций и напряжений). Связь между напряжениями и деформациями осуществляется через упругие постоянные.

У древесины близкая к линейной зависимость между напряжениями и деформациями наблюдается при кратковременных нагрузках до величины напряжений, соответствующей пределу пропорциональности. При этом можно с приближением считать, что древесина подчиняется закону Гука. Структурные особенности древесины определяют явно выраженные различия упругих свойств по разным направлениям, т. е. упругую анизотропию. Следовательно, применительно к древесине должна использоваться теория упругости анизотропного тела.

Ряд работ, проведенных Н.Н. Андреевым, А.П. Павловым, А.Н. Митинским, В.О. Самуилло, Н.Л. Леонтьевым, Е.К. Ашкенази, Ю.С. Соболевым и др., позволили установить характер упругой анизотропии древесины и получить значения упругих постоянных для разных объемов древесины.

Малым объемам древесины, в которых пренебрегают кривизной годичных слоев, можно с достаточным основанием приписать схему ортогональной анизотропии, т. е. считать древесину ортотропным телом, которое имеет три взаимно перпендикулярные плоскости структурной симметрии, являющиеся одновременно плоскостями симметрии механических свойств. Любые два направления, симметричные относительно какой-то такой плоскости, эквивалентны в отношении упругих свойств и прочности. Направления, нормальные к плоскостям симметрии, называются осями симметрии или главными осями анизотропии.

При ортогональной схеме анизотропии древесины плоскостями симметрии являются две продольные плоскости – радиальная *ar* и тангенциальная *at* и одна плоскость перпендикулярная направлению волокон – *rt* (рис. 43). Нормали этих плоскостей совпадают с направлениями осей структурной симметрии древесины: *a* – вдоль волокон, *r* – радиальное направление поперек волокон, *t* – тангенциальное направление поперек волокон (по касательной к годичным слоям).

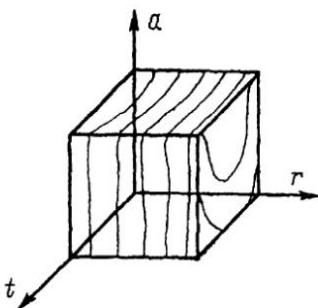


Рис. 43. Главные оси анизотропии древесины как ортотропного тела

Упругие деформации ортотропного тела для общего случая действия нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  напряжений по всем трем площадкам симметрии определяются согласно обобщенному закону Гука следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_a &= \frac{\sigma_a}{E_a} - \frac{\mu_{ar}\sigma_r}{E_r} - \frac{\mu_{at}\sigma_t}{E_t}; \quad \gamma_{ia} = \frac{\tau_{ta}}{G_{ia}}; \\ \varepsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E_r} - \frac{\mu_{ra}\sigma_a}{E_a} - \frac{\mu_{rt}\sigma_t}{E_t}; \quad \gamma_{ar} = \frac{\tau_{ar}}{G_{ar}}; \\ \varepsilon_t &= \frac{\sigma_t}{E_t} - \frac{\mu_{tr}\sigma_r}{E_r} - \frac{\mu_{ta}\sigma_a}{E_a}; \quad \gamma_{rt} = \frac{\tau_{rt}}{G_{rt}}, \end{aligned} \right\} \quad (66)$$

где  $\varepsilon$  – относительное удлинение или укорочение;  $\gamma$  – относительный сдвиг.

В уравнениях (66) упругие постоянные выражены через применяемые в технике показатели: модули упругости  $E$ , модули сдвига  $G$  и коэффициенты поперечной деформации  $\mu$ . При этом первый индекс у  $\mu$  указывает направление поперечной деформации  $\varepsilon'$ , второй – направление вызвавшего ее напряжения  $\sigma$ . Двойные индексы у  $G$  соответствуют направлениям осей симметрии, между которыми происходит изменение прямого угла. При определении упругих деформаций ортотропного тела необходимо знать 12 показателей, из которых 9 – независимые.

Для сравнения следует напомнить, что для определения упругих деформаций изотропного тела необходимы лишь три характеристики, из которых две – независимые.

Для крупных образцов (сортиментов) древесины, у которых нельзя пренебречь кривизной годичных слоев, а также при отсутствии правильной ориентации сечений элементов конструкции по отношению к годичным слоям (доски, бруски) есть основание применять схему трансверсально-изотропного тела. В этом случае предполагается, что для всех направлений, лежащих в плоскости перпендикулярной волокнам, механические свойства одинаковы. Следовательно, учитываются только различия между свойствами вдоль и поперек волокон. У трансверсально изотропного (транстропного) тела пять независимых характеристик упругости.

Между анизотропией упругих и прочностных свойств существует тесная связь. Однако различия в показателях прочности по разным струк-

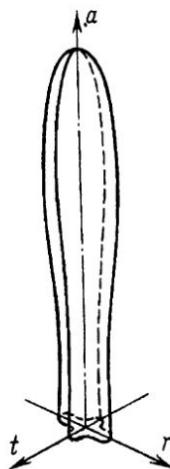
турным направлениям выражены слабее, чем в показателях упругих свойств.

Анизотропия механических свойств может быть наглядно представлена в виде геометрической фигуры (поверхности анизотропии), изображающей изменение показателя какого-либо свойства в зависимости от направления усилия. Например, на рис. 44 изображена поверхность анизотропии модуля упругости древесины ели. Подобный же вид имеют поверхности анизотропии предела прочности. Поверхность, изображенная на рис. 44, имеет явно выраженные три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии —  $ar$ ,  $at$ ,  $rt$ , что соответствует расчетной схеме ортотропного тела для малых объемов древесины. Наибольшая жесткость (и прочность) древесины соответствует направлению усилия вдоль волокон (по оси  $a$ ), наименьшая — в поперечном направлении, составляющем угол около  $45^\circ$  с тангенциальным  $t$  и радиальным  $r$  направлениями.

Рис. 44. Поверхность анизотропии модуля упругости древесины ели [по 5]

При расчете прочности элементов деревянных конструкций учитывают величину действующих усилий (напряжений), а также их ориентацию по отношению к волокнам и годичным слоям. Наиболее опасны растягивающие напряжения, действующие поперек волокон, т. е. перпендикулярно площадкам  $ar$  и  $at$  (см. рис. 43), и приводящие к появлению в древесине трещин, параллельных волокнам. Хрупко разрушается древесина и при скальвании из-за касательных напряжений, действующих, по указанным площадкам.

В некоторых элементах деревянных конструкций возникают сложные напряженные состояния, при которых нормальные (главные) напряжения действуют одновременно по двум или трем взаимно перпендикулярным площадкам. В этом случае расчет прочности ведется по так называемым критериям прочности древесины как анизотропного материала, подробно рассмотренным в работе [5]. Например, для случая плоского (двухосного) напряженного состояния, при котором по двум взаимно перпендикулярным площадкам, параллельным оси  $t$ , действуют главные растягивающие напряжения, условие прочности имеет вид:



$$\left. \begin{aligned} & \frac{\sigma_a^2 + c\sigma_r^2 + e\sigma_a\sigma_r + d\tau_{ra}^2}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_r^2 + \tau_{ra}^2 + \sigma_a\sigma_r}} \leq [\sigma_a]; \\ & c = \frac{\sigma_{W_a}}{\sigma_{W_r}}; \quad b = \frac{\sigma_{W_a}}{\sigma_{W_{ar}}^{45}}; \quad d = \frac{\sigma_{W_a}}{\tau_{W_{ra}}}; \\ & e = 4b - c - d - 1; \quad [\sigma_a] = \frac{\sigma_{W_a}}{K}, \end{aligned} \right\} \quad (67)$$

где  $\sigma_a$ ,  $\sigma_r$ ,  $\tau_{ra}$  – нормальные  $\sigma$  и касательные  $\tau$  напряжения, действующие по площадкам, перпендикулярным к осям  $a$  и  $r$ ;  $\sigma_{W_a}$ ,  $\sigma_{W_r}$ ,  $\sigma_{W_{ar}}^{45}$  – пределы прочности древесины данной влажности  $W$  при растяжении по оси  $a$ , по оси  $r$  и по направлению, составляющему угол  $45^\circ$  с осями  $a$  и  $r$ ;  $\tau_{W_{ra}}$  – предел прочности при скальвании вдоль волокон по тангенциальной плоскости, так как касательные напряжения действуют по площадке перпендикулярной оси  $r$  в направлении оси  $a$ ;  $[\sigma_a]$  – расчетное сопротивление при растяжении вдоль волокон;  $K$  – коэффициент запаса, принятый условно одинаковым при всех видах нагружения.

Таким образом, для расчета условий сохранения прочности детали при плоском напряженном состоянии необходимо знать механические характеристики древесины не только вдоль и поперек волокон, но и в диагональном направлении.

Различают следующие режимы нагружения: статический, динамический, вибрационный и длительный. Последние два режима связаны с продолжительным приложением нагрузок. В этих условиях заметно проявляется зависимость деформативности древесины от времени.

Древесина, или, точнее, материал клеточных стенок, в основном представляет собой комплекс природных полимеров, имеющих длинные гибкие цепные молекулы. Такая особенность строения полимеров определяет особый характер их поведения под нагрузкой. При приложении усилий к полимеру могут возникнуть следующие три вида деформаций: упругие – вследствие обратимого изменения средних междучастичных расстояний; высок эластические, связанные с обратимой перегруппировкой частиц (звеньев цепных молекул); при этом объем тела не изменяется;язкотекучие, обусловленные необратимым смещением молекулярных цепей; объем тела при этом также не изменяется.

Полимеры могут находиться в трех физических состояниях – стеклообразном, высок эластическом и вязко текучем. Каждое из них характеризуется преобладающим типом деформаций. Для первого состояния характерны обратимые упругие деформации, для второго – также обратимые высок эластические, для третьего – необратимые вязко текучие.

Переход полимеров из одного состояния в другое обычно происходит при изменении температуры, критические значения которой называются температурой стеклования  $t_c$  и температурой текучести  $t_f$ . Способность к увеличению деформации достигается не только повышением температуры, но и введением пластификатора. Теоретические исследования деформационных процессов полимеров проводятся на основе реологии.

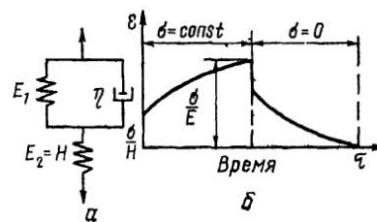
Реология – наука, устанавливающая наиболее общие законы развития во времени деформаций и течения любых веществ. Различают феноменологическую и молекулярную реологию. Первая из них характеризует внешние проявления механических свойств материала под действием нагрузки во времени, вторая изучает молекулярный механизм деформаций. Для феноменологической и отчасти молекулярной реологии характерно изучение поведения реального материала на идеализированных, чаще всего механических моделях. На рис. 45, а показана реологическая модель, состоящая из последовательно соединенных моделей упругого тела Гука и эластического тела Кельвина. Гуково тело символически изображено пружиной с модулем упругости  $E_2$ , Кельвиново тело – в виде параллельно соединенных пружины (модуль упругости  $E_1$ ) и демпфера с жидкостью, имеющей коэффициент вязкости  $\eta$ . Зависимость, связывающая напряжения  $\sigma$  и деформации  $\varepsilon$  такой модели, имеет вид

$$\sigma + n\dot{\sigma} = nH\dot{\varepsilon} + E\varepsilon, \quad (68)$$

где  $H = E_2$  – мгновенный модуль упругости;  $E = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$  – длительный модуль упругости;  $n = \frac{\eta}{E_1 + E_2}$  – время relaxation. Рис. 45, б показаны закономерности ее деформирования (б)

Рис. 45. Реологическая модель (а) и закономерности ее деформирования (б)

На рис. 45, б показаны закономерности деформирования модели. При приложении нагрузки мгновенно появляется деформация  $\sigma/H$ . Далее при постоянном напряжении  $\sigma = const$  возрастают по криволинейному закону эластические деформации, и при длительной выдержке деформация стремится к величине  $\sigma/E$ . После разгрузки немедленно возвращается упругая деформация, а затем с течением времени полностью исчезает эластическая деформация. Таким образом, указанная модель отражает поведение тела, деформации которого вполне обратимы.



Из формулы (68) видно, что поведение моделей и, следовательно, реальных тел можно описать при помощи соотношений, содержащих в общем случае напряжения, деформации и их производные по времени. Такие соотношения называются **реологическими уравнениями**; параметры, характеризующие модель (материал), называются **реологическими коэффициентами**, а напряжения и деформации – **реологическими переменными**.

Реологические коэффициенты можно получить при двух основных видах испытаний – на ползучесть и релаксацию. В первом случае ведется наблюдение за величиной деформации образца, возникающей под действием мгновенно приложенного и постоянного на протяжении испытания напряжения. Во втором случае образцу мгновенно сообщается начальная деформация, которая на протяжении опыта поддерживается постоянной. При этом величина начальных напряжений уменьшается. Кроме того, реологические испытания часто проводят при постоянной скорости возрастания напряжений или при постоянной скорости деформации.

К числу эксплуатационных и технологических свойств, проявляющихся при воздействии усилий, можно отнести твердость, ударную вязкость, износостойкость, способность удерживать крепления и др. Сюда же относится и обрабатываемость древесины режущими инструментами. Вопросы, характеризующие это свойство: качество обработанной резцом поверхности, влияние материала на затупление резца, удельная работа резания и др. – рассматриваются в руководствах по резанию древесины.

### **§ 19. Механические испытания древесины; принципы, общие требования и процедура**

**Области применения методов испытаний и их стандартизация.** Определение показателей механических и физических свойств древесины, характеризующих ее как материал, проводят для конкретных насаждений. Эти испытания позволяют учесть для каждой исследуемой породы влияние совокупности лесоводственных факторов на показатели физико-механических свойств чистой, т. е. без видимых пороков, древесины. Физико-механические испытания проводят и для установления влияния на свойства древесины технологических процессов ее обработки (сушки, пропитки, пропарки и др.), длительного пребывания в воде (топляковая древесина) или в земле, а также пороков. Иногда возникает необходимость определения показателей механических свойств чистой древесины круглых лесоматериалов, пиломатериалов и заготовок. Указанные выше области использования механических испытаний относятся к исследованиям древесиноведческого характера. Для оценки потребительских свойств лесоматериалов с присущими им пороками древесины проводят испытания, которые рассматриваются в товароведческой части курса.

Результаты испытаний можно сопоставить лишь в том случае, если они выполнены по одной и той же методике. Это вызывает необходимость стандартизации методов испытаний древесины, т. е. разработку единых требований к форме и размерам образцов, применяемому оборудованию, правилам проведения самих испытаний, способам вычисления показателей свойств и т. д.

Первый общесоюзный стандарт на методы физико-механических испытаний древесины ОСТ ВКС-7653, разработанный Л.М. Перелыгиным, был утвержден в 1935 г. Одновременно был разработан ОСТ НКЛес 196 на метод выбора модельных деревьев для исследования свойств древесины насаждений (А.И. Кондратьев и Н.Н. Абрамов). В дальнейшем эти стандарты были пересмотрены и заменены в 1938 г. ОСТ НКЛес 250 (Л.М. Перелыгин), в 1952 г. ГОСТ 6336-52 (Е.И. Савков, Н.Л. Леонтьев), а в 1965 г. – 18 отдельными стандартами ГОСТ 11483-65 – ГОСТ 11500-65 (Н.Л. Леонтьев).

Количество стандартов резко возросло в 1970–1974 гг., когда были утверждены ГОСТ 16483.0-70 – ГОСТ 16483.31-74. В настоящее время действует около четырех десятков принятых ранее стандартов (регистрационные номера 16483.0...39 и др.) на методы определения показателей физико-механических свойств древесины.

При испытаниях используют малые чистые (без пороков) образцы древесины. Они должны быть достаточно малого поперечного сечения во избежание влияния кривизны годичных слоев. При этом они должны включать в себя достаточно большое количество характерных для данной породы анатомических элементов, т. е. содержать по крайней мере 4–5 годичных слоев. В наших стандартах предусмотрены образцы с базисным поперечным сечением 20×20 мм (хотя у некоторых образцов размеры поперечного сечения несколько отличаются от указанных).

Годичные слои на торцовых поверхностях образцов должны быть параллельны одной паре противоположных граней и перпендикулярны другой. Направление волокон древесины должно совпадать с продольной осью образца. Такие образцы позволяют получить показатели свойств древесины как ортотропного материала.

**Отбор и подготовка образцов.** Для исследования свойств древесины насаждений подопытный материал заготавливают согласно ГОСТ 16483.6–80, предусматривающему правила закладки пробных площадей в насаждениях, выбора модельных деревьев на этих площадях и разделки модельных деревьев на кряжи. Далее кряжи распиливают на доски, из которых изготавливают бруски (заготовки). Бруски используют для получения образцов.

Материал для образцов с целью определения показателей свойств чистой древесины круглых лесоматериалов, пиломатериалов и заготовок

отбирают в соответствии с техническими условиями или другой документацией, утвержденной в установленном порядке.

Отбор материала в виде бревен, кряжей, а также досок и заготовок радиальной распиловки для сравнительных испытаний с целью определения влияния технологической обработки на свойства древесины проводится согласно ГОСТ 16483.21–72. Этот стандарт предусматривает правила отбора примерно одинаковых по исходным свойствам образцов путем выпиливания смежных образцов из одной возрастной зоны ствола (по годичным слоям или вдоль волокон), определения для древесины хвойных пород показателей макроструктуры (ширины годичных слоев и содержания поздней древесины) или на основании неразрушающих испытаний (см. ниже).

Показатели механических свойств древесины сильно зависят от ее влажности. При увлажнении древесины до предела насыщения клеточных стенок, показатели всех механических свойств резко уменьшаются. Дальнейшее повышение влажности древесины (свыше 30 %) практически не отражается на показателях механических свойств.

Следовательно, сравнивать показатели свойств древесины, имеющей разную влажность (в области ниже 30 %), нельзя. Для этой цели необходимо иметь показатели, относящиеся к древесине определенной, нормализованной влажности. Как уже отмечалось, нормализованная влажность составляет 12 %. Такая величина равновесной влажности древесины достигается в среднем при выдерживании ее при  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $65 \pm 5\%$ .

Рекомендуется доски, бруски (заготовки) перед разделкой на образцы выдерживать при  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $\phi = 65 \pm 15\%$  или даже подвергать камерной сушке (по мягким режимам при температуре не выше  $60^\circ\text{C}$ ), доводя влажность древесины до 9–15 %. Изготовленные образцы кондиционируют по влажности, выдерживая при указанных выше нормализованных параметрах воздуха до равновесной влажности. После этого образцы помещают в герметичные сосуды (эксикаторы, стеклянные банки с притертymi крышками и т. д.), где они хранятся до момента испытаний.

Немедленно после окончания испытаний определяют фактическую влажность образцов и подсчитанные показатели механических свойств приводят к влажности 12 %. Для пересчета показателей механических свойств (кроме показателей деформативности) к нормализованной влажности используют формулу

$$B_{12} = B_W [1 + \alpha(W - 12)], \quad (69)$$

где  $B_{12}$  – показатель данного свойства при влажности 12 %;  $B_W$  – показатель свойства при влажности  $W$ ;  $W$  – влажность древесины в момент испытаний;  $\alpha$  – поправочный коэффициент на влажность, показывающий на-

сколько изменяется показатель данного свойства при изменении влажности на 1 %.

Для пересчета значений модулей упругости и коэффициентов попречной деформации используют формулу

$$C_{12} = \frac{C_w}{1 - \alpha(W - 12)}, \quad (70)$$

где  $C_{12}$  – показатель свойства при влажности 12 %;  $C_w$  – показатель свойства при влажности  $W$ ;  $W$  – влажность древесины в момент испытаний;  $\alpha$  – поправочный коэффициент на влажность.

Для придания образцам нормализованной влажности требуется 1,5–2 мес. Не всегда имеется возможность обеспечить такую длительную выдержку материала перед испытаниями. Поэтому во всех ГОСТах на механические испытания древесины в дополнение к основному методу испытаний предусмотрены ускоренные методы [36]. Они допускают испытания образцов с влажностью равной или выше предела насыщения клеточных стенок. При этом для свежесрубленной древесины отпадает необходимость в выдержке образцов; не требуется и определения фактической влажности, так как за пределом насыщения клеточных стенок показатели механических свойств древесины, как уже отмечалось, не зависят от влажности.

Кроме того, для пяти наиболее распространенных видов механических испытаний с целью определения пределов прочности при сжатии и скальвании вдоль волокон, предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе, а также ударной вязкости при изгибе согласно ГОСТ 16483.3–84 – 16483.5–73, 16483.9–73 и 16483.10–73 допускается использование некондиционированных образцов при любой влажности.

Приведение полученных показателей прочности и деформативности  $B_w$  к нормализованной влажности  $B_{12}$  можно осуществлять по следующим формулам:

$$B_{12} = B_w K \quad (71)$$

или

$$B_{12} = \frac{B_w}{K_{12}^w}. \quad (72)$$

Значения коэффициентов  $K$  или  $K_{12}^w$  в зависимости от плотности древесины и средние значения этих коэффициентов для отдельных групп пород приведены в ГОСТах, а также в [10].

**Оборудование и процедура испытаний.** Для механических испытаний используют универсальные машины с электромеханическим, гидравлическим или ручным приводом; устройствами для закрепления образ-

ца и передачи на него нагрузки, измерения усилий, записи кривых «нагрузка-деформация».

Для измерения размеров образцов и их деформаций во время испытаний используют приборы: микрометры, индикаторы, рычажные тензометры, тензорезисторы и др. с погрешностью измерения от 0,1–0,001 мм. Для некоторых видов испытаний применяют специальные испытательные машины (например, маятниковые копры).

Приборы для измерения деформации, а также специальное оборудование для механических испытаний рассматриваются в ряде руководств [63, 36].

Испытания следует проводить в помещении лаборатории, в котором с помощью кондиционеров поддерживается температура воздуха 20° С и относительная влажность воздуха  $65 \pm 5\%$ , что обеспечивает сохранение во время испытаний по основному методу нормализованной влажности образцов. При применении ускоренных методов образцы до и в процессе испытания должны находиться в условиях, исключающих изменение их начальной влажности.

После определения по соответствующим формулам показателей исследуемого свойства и приведения показателей к нормализованной влажности выполняют статистическую обработку опытных данных.

## § 20. Статистический анализ результатов испытаний древесины

Показатель  $X$ , характеризующий любое физико-механическое свойство древесины, отличается большой изменчивостью. Результаты его измерений при повторении испытаний оказываются различными. Поэтому исчерпывающее представление о данном показателе можно было бы получить по результатам испытаний бесконечно большого числа образцов. Все множество полученных таким образом значений данного показателя называется генеральной совокупностью. Эту статистическую совокупность характеризует ряд параметров. Генеральное среднее  $\bar{X}$ , т. е. среднее арифметическое по всему множеству значений, – основной параметр совокупности. Генеральная дисперсия  $\sigma^2$  и генеральное среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  характеризуют меру рассеяния единичных результатов наблюдений, т. е. абсолютную величину их разброса вокруг среднего значения. Генеральный вариационный коэффициент  $V$  выражает в относительных величинах изменчивость единичных результатов по сравнению со средним значением. Экспериментальным путем точно определить указанные параметры нельзя; можно лишь приближенно оценить их, используя результаты наблюдений, составляющих лишь часть генеральной совокупности – выборку. Чем больше объем выборки, т. е. чем больше число объектов  $n$ , тем точнее оценки, поскольку

$$\bar{X} = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x}; \quad \sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} S^2, \quad (73)$$

где  $\bar{x}$  – выборочное среднее;  $S^2$  – выборочная дисперсия.

Для выборочной совокупности, состоящей из результатов испытаний однородных, т. е. не подлежащих дальнейшему делению, элементарных объектов определяют статистические параметры по следующим формулам:

выборочное среднее

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (74)$$

где  $x_i$  – результат единичного испытания;

выборочная дисперсия

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n} \right]; \quad (75)$$

среднее квадратическое отклонение

$$S = \sqrt{S^2}; \quad (76)$$

выборочный вариационный коэффициент, %,

$$v = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100; \quad (77)$$

дисперсия выборочного среднего

$$S_{\bar{x}}^2 = \frac{S^2}{n}; \quad (78)$$

среднее квадратическое отклонение выборочного среднего

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{S_{\bar{x}}^2} = \frac{S}{\sqrt{n}}; \quad (79)$$

относительная погрешность определения генерального среднего с доверительной вероятностью  $\alpha$

$$d_{\alpha} = t_{\alpha} \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}} = t_{\alpha} \frac{v}{\sqrt{n}}. \quad (80)$$

Тогда доверительный интервал генерального среднего определяется соотношением

$$\bar{x} - t_{\alpha} S_{\bar{x}} \leq \bar{X} \leq \bar{x} + t_{\alpha} S_{\bar{x}}. \quad (81)$$

Входящий в уравнения (80) и (81) квантиль распределения Стьюдента  $t_{\alpha}$  используют при ограниченном объеме выборки. В данном случае он характеризует отклонение значения случайной величины  $\bar{x}$  от ее среднего значения  $\bar{X}$ , отнесенное к среднему квадратическому отклонению  $S_{\bar{x}}$ . Значение коэффициента  $t_{\alpha}$  существенно зависит от объема выборки  $n$  (при  $n \leq 31$ ) и требуемой доверительной вероятности  $\alpha$ ; его можно найти в таблице приложения к ГОСТ 16483.0–78 или в других изданиях.

Пример. При испытании 25 образцов древесины сосны на сжатие вдоль волокон для этой выборки были определены следующие статистические характеристики предела прочности:  $\bar{x} = 48$  МПа,  $S = 5,76$  МПа и  $S_{\bar{x}} = 1,15$  МПа. При доверительной вероятности 0,95 и  $n = 25$  квантиль распределения Стьюдента  $t_{\alpha} = 2,064$ . Следовательно, относительная погрешность определения генерального среднего в этом случае согласно (80) составляет 4,95 %, а его доверительный интервал в соответствии с (81) равен  $48 \pm 2,37$  МПа. Это означает, что генеральное среднее предела прочности при его определении по любым другим подобным выборкам в 95 случаях из 100 окажется в диапазоне 45,63–50,37 МПа.

#### Количество объектов испытаний (образцов)

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 V^2}{d_{\alpha}^2}. \quad (82)$$

В древесиноведении принято оценивать генеральное среднее при доверительной вероятности 0,95 с относительной погрешностью  $d_{\alpha} = 5\%$ , если коэффициент вариации  $V \leq 20\%$ , и с погрешностью  $d_{\alpha} = 10\%$ , если  $V > 20\%$ . Для предварительного определения минимального количества образцов принимают ориентировочные значения коэффициента вариации, равные, например, для пределов прочности при сжатии вдоль волокон 13 %, при статическом изгибе 15 %, а для ударной вязкости 32 %. Более полные данные о коэффициентах вариации приведены в таблицах ССД «Древесина. Показатели физико-механических свойств малых образцов без пороков». Квантиль Стьюдента находят, задавшись предполагаемым значением  $n$ . Если рассчитанное по формуле (82) значение  $n$  окажется больше или меньше предполагаемого, расчет повторяют до тех пор, пока различие между ними будет не более 1. Каждый раз при этом  $t_{\alpha}$  принимают соответствующим  $n$ , полученному в предыдущем расчете.

В том случае, когда количество образов в выборке превышает 31, вместо квантиля распределения Стьюдента в формулу (82) подставляют квантиль нормального распределения.

Если по результатам испытаний данной серии из  $n$  образцов будет получен такой коэффициент вариации  $v$ , что относительная погрешность  $d_a$  окажется больше допустимой, по формуле (82) устанавливают необходимый новый объем выборки, исходя из фактического значения  $v$ . Для этого испытывают дополнительное количество образцов или проводят повторные испытания.

Описанный порядок статистической обработки результатов испытаний выполняется при так называемом одностадийном отборе однородных объектов для формирования выборки. Часто генеральная совокупность значений данного показателя свойств древесины должна характеризовать сложные неоднородные структуры (насаждение, дерево, партия пиломатериалов и т. д.). В этих случаях следует применять многостадийный способ формирования выборки, проводя на каждой (или хотя бы на первой) стадии случайный отбор естественно образованных сложных, затем простых групп и, наконец, отдельных однородных элементов структуры, например, в такой последовательности: модельное дерево – кряж – образец для испытаний или доска – брусок (заготовка) – образец.

Многостадийный отбор позволяет обеспечить заданную точность статистического обследования при сокращенном количестве использованных деревьев, кряжей, досок. Это достигается за счет учета дисперсии в пределах объектов каждой стадии отбора. При установлении объема выборки на каждой стадии отбора учитываются расходы, обусловленные стоимостью объекта, затратами на его изготовление и испытания.

При двухстадийном отборе (например, сначала досок из партии, а затем образцов из доски) количество отдельных элементов (образцов), отбираемых на второй стадии,

$$r = \frac{S_{22}}{S_{21}} \sqrt{\frac{C_{21}}{C_{22}}} = \frac{v_{22}}{v_{21}} \sqrt{\frac{C_{21}}{C_{22}}}; \quad (83)$$

число отбираемых на первой стадии групп элементов (досок)

$$n_2 = \frac{t_a^2 (v_{21}^2 + v_{22}^2/r)}{d_a^2}. \quad (84)$$

В формулах (83) и (84)  $S$  и  $v$  (дисперсия и коэффициент вариации) при двухстадийном отборе характеризуют рассеяние между группами элементов на первой стадии отбора (второй индекс – единица) или рассеяние между образцами на второй стадии (второй индекс – двойка). Литерами  $C_{21}$  и  $C_{22}$  обозначены расходы соответственно на группу и отдельный элемент. Первый индекс при  $S$ ,  $v$  и  $C$ , а также при  $n$  указывает, что отбор двухстадийный.

При многостадийном отборе изменяется статистический анализ результатов испытаний. В случае двухстадийного отбора вычисляют выборочное среднее

$$\bar{x} = \frac{1}{n_2 r} \sum_{i=1}^{n_2} \sum_{j=1}^r x_{ij}, \quad (85)$$

где  $i$  – номер группы (доски);  $j$  – номер элемента (образца).

Дисперсия выборочного среднего

$$S_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{n_2(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_2} (\bar{x}_i - \bar{x})^2, \quad (86)$$

где  $\bar{x}_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r x_{ij}$  – среднее  $i$ -й группы.

Используя указанные параметры, по формуле (81) находят доверительный интервал генерального среднего.

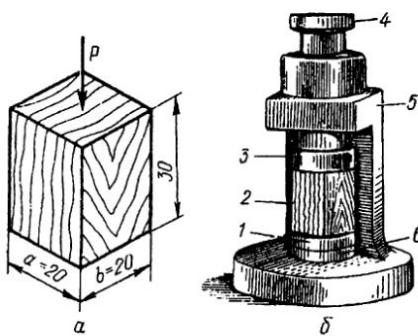
**Пример.** Для определения плотности древесины партии досок отобрали случайным образом четыре доски ( $n_2 = 4$ ) и из каждой изготовили по три образца ( $r = 3$ ). Результаты испытаний,  $\text{кг}/\text{м}^3$ :  $x_{1j} = 580, 580, 508$ ;  $x_{2j} = 455, 447, 433$ ;  $x_{3j} = 471, 492, 460$ ;  $x_{4j} = 427, 400, 389$ . Сумма всех значений плотности  $\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 x_{ij} = 5642$ . Тогда выборочное среднее согласно (85) равно  $\bar{x} = 5642 / (4 \cdot 3) = 470,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Сумма квадратов отклонений средних значений  $\bar{x}_i$  плотности досок от выборочного среднего  $\bar{x}$  равна  $\sum_{i=1}^4 (\bar{x}_i - \bar{x})^2 = 12230,55$ . Отсюда согласно (86) дисперсия выборочного среднего равна  $S_{\bar{x}}^2 = 12230,55 / [(4 - 1)4] = 1019,2$ , а среднее квадратическое отклонение  $S_{\bar{x}} = 31,9 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Если же обработать приведенные выше результаты испытаний, используя формулы (74), (75), (79), то искомая характеристика оказывается значительно больше  $S_{\bar{x}} = 61,5 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

## § 21. Прочность древесины при сжатии

**Сжатие вдоль волокон.** Показатели этого основного свойства древесины определяются при испытании образцов в виде прямоугольной призмы (рис. 46,а). Основание призмы соответствует базисному сечению ( $20 \times 20 \text{ мм}$ ), а высота –  $30 \text{ мм}$ . Фактические поперечные размеры  $a$  и  $b$  определяют с погрешностью  $0,1 \text{ мм}$  на уровне половины высоты образца. Испытания проводят с помощью приспособления (рис. 46,б).

Рис. 46. Испытание древесины на сжатие вдоль волокон:

*a* – образец; *b* – приспособление: 1, 6 – съемная шаровая опора; 2 – образец; 3 – пuhanсон; 4 – шаровая опора; 5 – корпус



Образец нагружают равномерно с постоянной скоростью роста нагрузки или перемещения активного захвата машины. Скорость должна быть такой, чтобы образец разрушился через 0,5–1,5 мин с момента начала нагружения. Разрушение образца устанавливают по началу возврата стрелки силоизмерителя, контрольная стрелка указывает по шкале максимальную нагрузку  $P_{\max}$ , Н. Предел прочности  $\sigma_w$ , МПа, вычисляют по формуле

$$\sigma_w = \frac{P_{\max}}{a \cdot b}. \quad (87)$$

Вычисление производят с округлением до 0,5 МПа.

Влажность древесины в момент испытаний определяют высушиванием разрушенных образцов. Минимальное количество проб на влажность вычисляют по формуле (82). Затем по формуле (69) пересчитывают полученные для каждого испытанного образца значения пределов прочности к влажности 12 %. Поправочный коэффициент  $\alpha$  для всех пород принимают равным 0,04. Данные, полученные для всех испытанных образцов, подвергают статистической обработке, используя формулы (74) – (81).

Пределы прочности древесины при сжатии вдоль волокон для основных пород приведены в табл. 30\*.

Как видим, предел прочности древесины при сжатии вдоль волокон сильно зависит от влажности. Прочность комнатно-сухой древесины в 2–2,5 раза выше чем свежесрубленной.

В среднем для всех изученных пород при влажности 12 % предел прочности на сжатие вдоль волокон примерно равен 50 МПа. Предел пропорциональности при сжатии вдоль волокон для некоторых наших пород

\* Характеристики механических свойств в этой главе даются в соответствии с РТМ [26] и таблицами ССД «Древесина». Показатели физико-механических свойств малых образцов без пороков\*. В данной и нижеследующих таблицах (если нет особых указаний) приведены округленные средние показатели РТМ, пересчитанные на влажность 12 %, а также на влажность 30 % и более. В РТМ и таблицах ССД имеются более подробные данные для большинства наших пород из разных районов произрастания.

(лиственница, сосна, пихта, дуб, ясень) составляет в среднем 0,7 предела прочности.

### 30. Прочность древесины при сжатии вдоль волокон

Порода	Предел прочности, МПа, при влажности, %		Порода	Предел прочности, МПа, при влажности, %	
	12	30 и более		12	30 и более
Лиственница	62	25	Дуб	57	31
Сосна	46	21	Бук	53	27
Ель	45	19	Орех грецкий	55	23
Кедр	40	16	Береза	54	26
Пихта сибирская	40	17	Вяз	47	25
Акация белая	73	41	Липа	46	24
Граб	61	36	Ольха	45	23
Клен	59	28	Осина	43	19
Ясень	56	32	Тополь	40	17
Груша	58	26			

Можно выделить типичные виды разрушения при сжатии вдоль волокон (рис. 47). У пород с легко деформируемой древесиной, а также у всех пород при высокой влажности древесины наблюдается смятие торцов образца (рис. 47, а). У пород с древесиной повышенной жесткости при разрушении появляется косая складка, обычно расположенная под углом 60–70° на тангенциальной поверхности образца (рис. 47, б). Довольно часто можно обнаружить у разрушенного образца две встречные косые складки, образующие клиновидный участок, под которым видна трещина от продольного раскола (рис. 47, в). Иногда наблюдается расслоение образца и другие виды разрушения. Все это свидетельствует о существенном влиянии на показатели прочности при сжатии вдоль волокон особенностей строения и анизотропии механических свойств древесины.

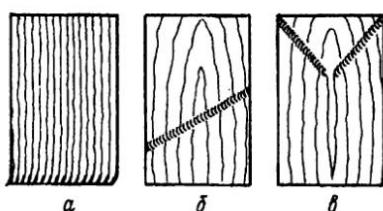


Рис. 47. Типичные виды разрушения образца при сжатии вдоль волокон:  
а – смятие торцов; б – косая складка; в – встречные косые складки с продольным расколом

Исследования В.Е. Москоловой, Ю.М. Иванова и других показали, что изменения в микроскопическом строении происходят только в зоне разрушения, а в остальном объеме образца древесина остается неповрежденной. Сложное напряженное состояние возникает в приторцовых зонах образца из-за стеснения, вследствие трения, поперечных деформаций. Наблюдаются также и стеснение угловых деформаций.

Для уменьшения влияния приторцового эффекта предпринимались попытки увеличить высоту образца. Однако это приводило к потере устойчивости образца при испытаниях в конечной стадии нагружения. Исследовались возможности изменения формы образца путем увеличения сечения приторцовой зоны [56]. При испытаниях сосновых образцов общей высотой 35 мм с головками 26×26×4 мм и плавным переходом к средней части (сечением 20×20 мм), в которой действуют достаточно равномерно распределенные основные напряжения  $\sigma_a$ , пределы прочности оказались в среднем на 8,5 % выше, чем при испытаниях стандартных образцов. Как видим, различие в показателях не слишком значительно. Образцы усложненной формы, учитывая трудности их изготовления, целесообразно применять лишь для исследовательских целей.

Следует отметить, что предел прочности при сжатии вдоль волокон наименее изменчив по сравнению с показателями других свойств древесины.

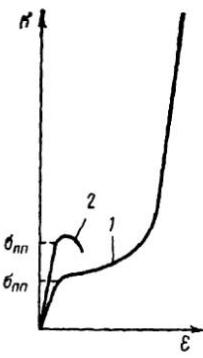
В конструкциях и изделиях древесина очень часто работает на сжатие вдоль волокон, что объясняется ее высокой прочностью при данном виде действия усилий и удобством их приложения.

**Сжатие поперек волокон.** Возможны две типичные диаграммы сжатия (рис. 48), отражающие связь между напряжениями и деформациями [49].

Рис. 48. Диаграммы сжатия древесины поперек волокон:  
1 – трехфазная; 2 – однофазная

Трехфазная диаграмма наиболее четко выражена при сжатии в радиальном направлении древесины хвойных пород. Начальный, почти прямолинейный, участок (первая фаза) этой диаграммы отражает сопротивление слабой ранней древесины годичных слоев. После потери устойчивости анатомических элементов происходит процесс их смятия, не требующий больших дополнительных усилий, и на диаграмме появляется второй, слегка наклоненный к оси абсцисс, участок (вторая фаза). Постепенно начинают оказывать сопротивление более прочные и жесткие анатомические элементы поздних зон, что находит отражение в участке, расположенным под большим углом к оси абсцисс (третья фаза). Последняя фаза деформирования, несмотря на большие нагрузки, приводит лишь к уплотнению древесины и не завершается разрушением образца.

У лиственных пород при сжатии как в радиальном, так и в тангенциальном направлении происходит смятие анатомических элементов и наблюдается трехфазная диаграмма, хотя и менее явно выраженная. Однофазная диаграмма характерна для древесины хвойных пород при сжатии в



тангенциальном направлении. В этом случае усилия воспринимают одновременно ранние и поздние зоны годичных слоев. Однако наибольшие напряжения возникают в жестких поздних зонах. Эти более прочные зоны и определяют сопротивление разрушению всего образца. Нагружение приводит к явному разрушению образцов; они выпучиваются в сторону выпуклости годичных слоев. Однофазная диаграмма обнаруживается при радиальном сжатии сухой древесины дуба, что связано с наличием широких сердцевинных лучей. По наблюдениям О.С. Мыльниковой (ЛТА) разрушение имеет вид, схематично показанный при сжатии вдоль волокон на рис. 47, в.

Поскольку в большинстве случаев при действии сжимающих усилий поперек волокон не удается установить максимальную нагрузку, приводящую к окончательному разрушению образца, ограничиваются определением предела пропорциональности, который принимают за условный предел прочности.

Различают два вида испытаний – на сжатие и местное смятие поперек волокон. При первом виде испытаний нагрузка прикладывается равномерно по всей поверхности образца, при втором – по всей ширине, но лишь на части длины. Возможен и третий вид испытаний, при котором нагрузка прикладывается на площадку, ограниченную частью ширины и длины образца.

Для испытаний используют образцы, формы и размеры которых указаны на рис. 49, а, б. Испытания при действии усилий в радиальном и тангенциальном направлениях проводят на отдельных образцах. У образца для испытания на сжатие измеряется длина  $l$  и на половине длины ширина  $a$  с точностью до 0,1 мм. У образца для испытания на местное смятие измеряется с той же точностью только его ширина  $a$ .

Для испытаний используют приспособление, изображенное на рис. 49, в, которое имеет два съемных пуансона. Плоский пуансон (без выступа) применяют при испытании на сжатие; пуансон с выступом длиной 20 мм и закругленными ребрами (радиус 2 мм) – для испытаний на смятие.

Непрерывно нагружая образец не менее 10 раз через равные интервалы нагрузки  $P$ , определяют укорочение образца  $\Delta l$  с погрешностью не более 0,01 мм и строят график зависимости  $P = f(\Delta l)$ . Ординату точки, в которой тангенс угла между касательной к графику и осью  $P$  на 50 % больше, чем на линейном участке графика, принимают за нагрузку  $P_{y,n}$ , соответствующую условному пределу прочности. Если испытательная машина снабжена устройством, обеспечивающим запись нагрузки в масштабе не более 50 Н/мм и укорочения  $\Delta l$  в масштабе не более 0,01 мм/мм, то величину  $P_{y,n}$  можно определить по диаграмме сжатия, вычерченной машиной. Во всех случаях продолжительность равномерного нагружения до достижения условного предела прочности должна быть 1–2 мин.

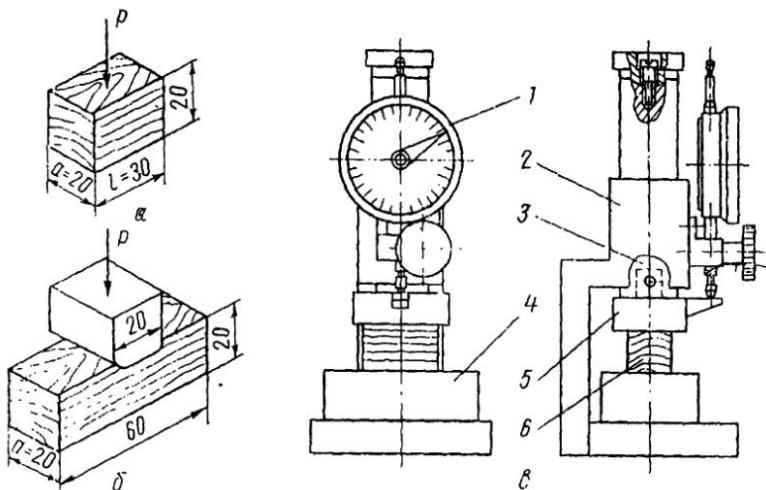


Рис. 49. Испытания древесины на сжатие и местное смятие поперек волокон:  
а – образец для испытания на сжатие; б – образец и схема испытаний на смятие; в – приспособление для испытаний: 1 – индикатор; 2 – корпус; 3 – шток; 4 – подставка; 5 – съемный пуансон; 6 – образец

Условный предел прочности вычисляют с округлением до 0,1 МПа при сжатии поперек волокон по формуле

$$\sigma_{w.y} = \frac{P_{y,n}}{al}, \quad (88)$$

где  $P_{y,n}$  – нагрузка, Н;

$a$  – ширина образца, мм;

$l$  – длина образца, мм,

а при местном смятии поперек волокон по формуле:

$$\sigma_{w.y} = \frac{P_{y,n}}{18a}, \quad (89)$$

где 18 – средняя ширина выступа пуансона, мм

Прочность при сжатии и смятии поперек волокон исследована слабо. Некоторые средние данные, приведенные в табл. 31, следует рассматривать как ориентировочные.

Определение влажности древесины в момент испытаний, приведение значений условного предела прочности к нормализованной влажности (поправочный коэффициент  $\alpha = 0,035$ ) и их статистическую обработку проводят так же, как и при испытаниях на сжатие вдоль волокон.

31. Условные пределы прочности при сжатии и местном смятии поперек волокон

Порода	Условный предел прочности, МПа							
	Сжатие поперек волокон при влажности, %				Местное смятие поперек волокон при влажности, %			
	12	30 и более	12	30 и более	12	30 и более	12	30 и более
	1	2	1	2	1	2	1	2
Лиственница	4,3	2,6	6,1	2,4	6,1	3,6	9,3	3,8
Сосна	5,1	3,0	7,5	3,0	—	—	13,6	5,6
Пихта	2,1	1,3	2,4	1,0	2,5	1,5	3,5	1,4
Граб	6,5	3,9	6,0	3,6	13,7	8,0	11,3	6,9
Ясень	—	—	—	—	8,3	5,1	10,6	6,5
Дуб	—	—	—	—	9,1	5,5	5,3	3,2
Бук	6,1	3,6	6,3	3,8	11,4	6,9	10,8	6,7
Вяз	5,7	3,4	4,6	2,8	11,0	6,7	11,0	6,7
Липа	5,5	3,3	5,1	3,0	9,6	5,9	9,8	6,0
Ольха	6,7	4,1	3,7	2,3	8,0	4,9	5,3	3,2
Осина	5,4	3,2	3,5	2,1	6,3	3,8	4,8	2,8

П р и м е ч а н и е . Цифра 1 обозначает радиальное направление, цифра 2 – тангенциальное.

Как видим, условный предел прочности при сжатии поперек волокон для всех пород в среднем примерно в 10 раз меньше предела прочности при сжатии вдоль волокон.

Предел прочности при местном смятии из-за дополнительного сопротивления изгибу волокон оказывается выше, чем при простом сжатии поперек волокон. Однако эта разница не столь большая, как можно заключить из данных табл. 31, в которой представлены ориентировочные и поэтому трудно сопоставимые для разных видов испытаний данные. В работе [49] отмечается, что это увеличение составляет 20–25 %. При испытании древесины с помощью штампа, передающего нагрузку на часть длины и ширины образца, значения условного предела прочности оказываются еще несколько выше из-за сопротивления древесины скальванию поперек волокон у ребер штампа, расположенных вдоль волокон.

Следует заметить, что пока стандартизованы методы только для двух видов испытаний. Вначале был разработан стандартный метод испытания на местное смятие (с целью определения по существу контактной прочности древесины), а позднее – на сжатие поперек волокон. Форма, размеры и ориентация волокон в образце (рис. 49, а) такова, что его можно изготавливать из той же возрастной зоны ствола, что и образец на местное смятие (рис. 49, б), обеспечивая лучшие условия для сравнения показателей. Однако на результаты испытания образца по схеме рис. 49, а оказывает влияние стеснение его деформаций на поверхностях, контактирующих с пuhan-

соном и подставкой. Для исследовательских целей можно использовать образец с усиленными торцовыми частями, что повышает предел прочности, как показано в работе [56]: для сосны в радиальном направлении на 13 %, а в тангенциальном – на 42 %.

Все три возможных случая действия сжимающих нагрузок встречаются в практике. Например, сжатие поперек волокон происходит при изготовлении прессованной древесины, местное смятие наблюдается в шпалах под рельсами, а третий вид нагружения – при использовании древесины в качестве подкладок под стойки и т. д.

## § 22. Прочность древесины при растяжении

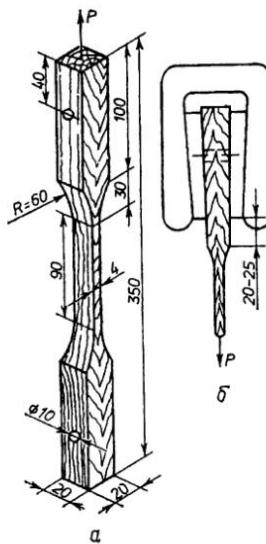
**Растяжение вдоль волокон.** Для определения прочности применяют образцы довольно сложной формы с массивными головками, которые зажимают в клиновидных захватах машины, и тонкой рабочей частью. Форма, размеры образца и схема его крепления показаны на рис. 50. При такой форме образца предупреждается возможность его разрушения в местах крепления от сжатия поперек волокон и скальвания вдоль волокон. Переход от головок к рабочей части образца делают плавным во избежание концентрации напряжений. Заготовки для образцов получают путем выкалывания (а не выпиливания), чтобы не допустить перерезания волокон. Рабочая часть образца должна захватывать как можно больше годичных слоев, поэтому ее широкая грань совпадает с радиальным направлением. Допускается изготавливать образцы с наклеенными головками.

Рис. 50. Испытание древесины на растяжение вдоль волокон:

*a* – образец; *b* – схема закрепления образца в захватах испытательной машины

Перед испытанием измеряют толщину *a* и ширину *b* рабочей части образцов с погрешностью до 0,1 мм и в отверстия головок вставляют стальные пробки диаметром 9,9 мм. Длина пробок на 3 или 2 мм (соответственно для древесины мягких и твердых пород) меньше толщины головки. Пробки предотвращают чрезмерное смятие головок во время испытаний.

Образец нагружают с такой скоростью, чтобы разрушение его наступило через 1,5 – 2 минуты. Определяют максимальную нагрузку и вычис-



ляют предел прочности по формуле (87), округляя результаты до 1 МПа. В качестве проб на влажность используют рабочие части образцов. Порядок дальнейших операций и расчетов соответствует рассмотренному в предыдущем параграфе, но поправочный коэффициент на влажность  $\alpha = 0,01$ .

Предел прочности древесины на растяжение вдоль волокон сравнительно слабо зависит от влажности древесины, но резко падает при малейшем отклонении волокон от направления продольной оси образца. Представление о прочности древесины некоторых пород при данном виде действия усилий дает табл. 32.

32. Прочность древесины при растяжении вдоль волокон

Порода	Предел прочности, МПа, при влажности, %		Порода	Предел прочности, МПа, при влажности, %	
	12	30 и более		12	30 и более
Лиственница	124	95	Ясень	140	107
Сосна	109	78	Граб	129	96
Ель	101	77	Осина	121	93
Кедр	89	68	Бук	124	93
Пихта сибир- ская	66	51	Липа	117	89
Акация белая	171	107	Ольха	97	74
Береза	137	102	Тополь	88	67

Предел пропорциональности при растяжении вдоль волокон составляет от величины предела прочности 0,82 для древесины хвойных пород (лиственница, сосна, пихта) и 0,7 для лиственных кольцесосудистых (дуб, ясень) [49].

В среднем для всех пород предел прочности на растяжение вдоль волокон 130 МПа. Несмотря на столь высокую прочность, древесина в конструкциях и изделиях довольно редко работает на растяжение вдоль волокон из-за трудности предотвращения разрушения деталей в местах закрепления (под действием сжимающих и скалывающих нагрузок).

**Растяжение поперек волокон.** По ныне действующему стандарту для испытаний рекомендуется образец, форма и размеры которого показаны на рис. 51. Этот образец по форме напоминает образец для испытаний на растяжение вдоль волокон. Однако в данном случае образцы крепятся в винтовых захватах с плоской стороны, чтобы сжимающие усилия были направлены вдоль волокон.

Затруднения, возникающие при изготовлении образца сравнительно большой (для плоскости поперек волокон) длины, могут быть уменьшены путем использования клееных образцов. В клеенных образцах центральный участок из исследуемой древесины должен иметь длину не менее 90 мм и включать в себя плоскую рабочую зону, криволинейные переходы и небольшую часть длины головок.

Рис. 51. Образец для испытания древесины на растяжение поперек волокон

Для определения предела прочности при растяжении поперек волокон в радиальном и тангенциальном направлениях образец изготавливают таким образом, чтобы годичные слои на плоской его стороне были направлены соответственно поперек (как показано на рис. 51) или вдоль длины его рабочей части.

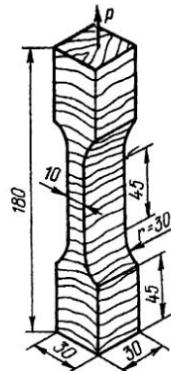
Перед испытаниями измеряют размеры сечения рабочей части образца. Скорость нагружения должна быть такой, чтобы образец разрушился через 1,5–2 мин. Для образцов, разрушившихся в рабочей части, находят максимальную нагрузку  $P_{max}$ , вычисляют предел прочности по формуле (87), округляя результат до 0,01 МПа. Далее проводят такие же операции и расчеты, как при испытаниях на растяжение вдоль волокон; однако поправочные коэффициенты на влажность равны 0,01 и 0,025 соответственно при радиальном и тангенциальном растяжении.

Исчерпывающих данных о сравнительной прочности древесины на растяжение поперек волокон для разных пород, установленных при использовании стандартной формы образца, еще нет. В табл. 33 представлены данные [49], полученные по единообразной методике, но с использованием образцов, форма которых соответствовала ранее действовавшему стандарту. Эти образцы имели трапециевидные головки и очень короткую рабочую часть. Вследствие концентрации напряжений значения пределов прочности оказывались заниженными. Здесь приведены показатели, пересчитанные к 12 % влажности, и полученные в опытах данные для древесины трех пород при влажности 30%.

### 33. Прочность древесины при растяжении поперек волокон

Порода	Предел прочности, МПа, при влажности, %				Порода	Предел прочности, МПа, при влажности, %			
	12	>30	12	>30		12	>30	12	>30
	1	2	1	2		1	2	1	2
Лиственница	5,6	—	5,2	—	Граб	13,3	—	8,4	—
Сосна	5,4	3,9	3,5	2,4	Клен	13,3	—	9,2	—
Ель	5,0	—	3,2	—	Бук	12,5	—	8,5	—
Кедр	4,2	—	2,8	—	Береза	11,1	5,7	6,5	3,5
Пихта	4,0	—	2,9	—	Липа	8,3	—	5,0	—
Ясень	9,0	—	4,2	—	Ольха	7,2	—	5,9	—
Дуб	8,0	7,4	6,5	6,1	Осина	7,1	—	4,6	—

П р и м е ч а н и е . Цифра 1 обозначает радиальное направление, а цифра 2 – тангенциальное.



Из приведенных данных следует, что прочность древесины в радиальном направлении больше, чем в тангенциальном, у хвойных пород на 10–50 %, у лиственных – на 20–70 %. Наибольшую прочность имеют твердые рассеяннососудистые лиственные породы, затем идут кольцесосудистые лиственные и далее мягкие рассеяннососудистые лиственные. Хвойные породы по сравнению с лиственными имеют значительно меньшую прочность при растяжении как в радиальном, так и в тангенциальном направлении.

В среднем прочность при растяжении поперек волокон для всех изученных пород составляет примерно 1/20 прочности при растяжении вдоль волокон.

При конструировании изделий из древесины стараются не допускать действия растягивающих нагрузок, направленных поперек волокон. Показатели прочности древесины при данном виде усилий необходимы для разработки режимов резания и сушки древесины. Именно эти показатели характеризуют предельную величину сушильных напряжений, достижение которой вызывает растрескивание материала. При расчетах безопасных режимов сушки древесины учитывают зависимость пределов прочности от влажности и температуры, а также длительности приложения нагрузки (скорости нагружения).

### § 23. Прочность древесины при статическом изгибе

К числу наиболее распространенных и сравнительно легко выполняемых видов механических испытаний древесины относится ее испытание на поперечный изгиб. Нагружение образца проводят в статическом режиме, постепенно увеличивая изгибающие усилия, в отличие от ударного изгиба (см. ниже) с мгновенным приложением полной нагрузки. Прочность при статическом изгибе – одна из важнейших механических характеристик древесины.

Для испытания применяют образцы в форме бруска размерами 20×20×300 мм. После измерения посередине длины образца ширины  $b$  – в радиальном и высоты  $h$  – в тангенциальном направлении с погрешностью до 0,1 мм его располагают на двух опорах. Пролет  $l$ , т.е. расстояние между центрами опор, равен 240 мм. Нагружают образец в одной точке посередине пролета (рис. 52). Опоры и нажимные ножи имеют закругления радиусом 30 мм. Скорость непрерывного нагружения должна быть такой, чтобы образец разрушился через 1–2 мин. Определив максимальную нагрузку  $P_{max}$ , Н, вычисляют предел прочности, МПа, по формуле

$$\sigma_w = \frac{3P_{max}l}{2bh^2}. \quad (90)$$

Результаты вычисления округляют до 1 МПа.

Рис. 52. Схема испытания древесины на статический изгиб

Фактическую влажность определяют по пробам, взятым вблизи излома у необходимого количества образцов (см. § 20) и пересчитывают предел прочности к влажности 12 % по формуле (69), используя по-правочный коэффициент  $\alpha$ , равный для всех пород 0,04. В образце при нагружении возникают сжимающие напряжения в верхней, согласно схеме на рис. 52), части образца и растягивающие в нижней. Поскольку прочность на сжатие вдоль волокон значительно меньше прочности на растяжение, разрушение начинается с образования редко видимых складок в сжатой зоне образца. Окончательное разрушение происходит в растянутой зоне в виде разрыва или отслоения крайних волокон и полного излома образца. При низкой прочности образца получается почти гладкий излом (рис. 53), а при высокой – защепистый (особенно в растянутой зоне).

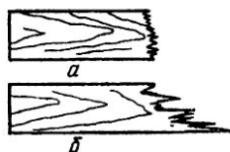
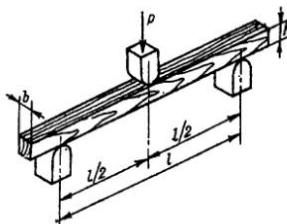
Рис. 53. Вид излома образца при изгибе:

*a* – гладкий; *b* – защепистый

Данные о пределе прочности при статическом изгибе для древесины некоторых наших пород представлены в табл. 34.

#### 34. Прочность древесины при статическом изгибе

Порода	Предел прочности, МПа, при влажности, %		Порода	Предел прочности, МПа, при влажности, %	
	12	30 и более		12	30 и более
Лиственница	109	61	Орех грецкий	108	60
Сосна	85	49	Береза	110	65
Ель	79	43	Бук	104	63
Кедр	69	36	Дуб	103	66
Пихта сибирская	68	40	Вяз	92	58
Акация белая	148	96	Липа	86	53
Граб	128	74	Ольха	79	48
Ясень	118	73	Осина	77	45
Клен	115	66	Тополь	68	40
Груша	106	62			



Предел прочности при статическом изгибе в среднем можно принять равным 100 МПа. Предел пропорциональности при статическом изгибе составляет примерно 0,6–0,7 от предела прочности.

При испытаниях, проводимых по стандартной методике, образец располагается на опорах так, чтобы усилия были направлены вдоль годичных слоев (тангенциальный изгиб). Различие между прочностью при радиальном и тангенциальном изгиба обнаруживается только для хвойных пород: предел прочности при тангенциальном изгибе на 10–12 % выше, чем при радиальном; для лиственных пород прочность при изгибе в обоих направлениях практически можно считать одинаковой [49].

Более сложны в исполнении методы испытаний, предусматривающие такую схему нагружения, которая обеспечивает чистый изгиб, т. е. отсутствие касательных напряжений по части или всей длине пролета. Схема нагружения в двух точках (рис. 54, а) была принята в ранее действовавших ГОСТах. Однако в соответствии с международными стандартами она заменена на более простую схему одноточечного нагружения (см. рис. 52), которая дает практически одинаковые результаты. Значительно сложнее осуществлять нагружение образца в опорных сечениях сосредоточенными моментами, т. е. по схеме рис. 54, б. Такая схема, применяемая для испытания пластмасс, гнутоклееной древесины, была использована [56] для исследования механических характеристик натуральной древесины. По сравнению с двухточечной схемой при одинаковых пролетах  $l = 240$  мм предел прочности для сосны оказался выше на 2 %. Однако при сокращении длины пролета до 130 мм предел прочности увеличился на 12,6 %.

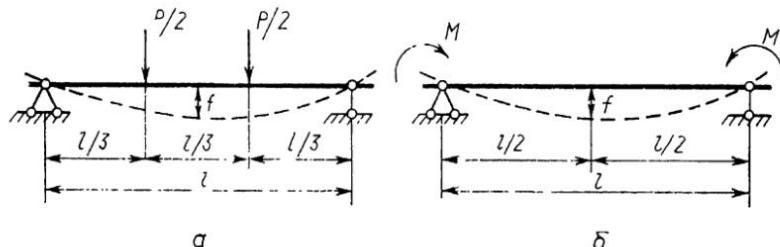
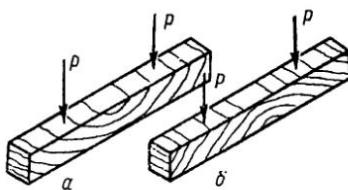


Рис. 54. Схемы испытаний на изгиб образца:  
а – при нагружении в двух точках; б – при нагружении сосредоточенными моментами

Кроме обычного поперечного изгиба, когда волокна древесины направлены вдоль оси бруска (см. рис. 52), могут быть случаи, когда волокна направлены поперек оси бруска (рис. 55). Опыты, проведенные в МЛТИ автором и А.Л. Михайличенко, показывают, что в двух последних случаях предел прочности составляет для древесины ели и сосны 4–5 %, а для бука – около 20 % предела прочности при обычном изгибе. Разницы в пределах прочности образцов, расположенных по отношению к действующим усилиям по схеме а и б рис. 55, не было установлено.

Рис. 55. Схема действия усилий при изгибе образцов с поперечным относительно оси направлением волокон

Вследствие высокой прочности при действии изгибающих нагрузок и удобства их приложения древесина очень часто работает в конструкциях и изделиях на изгиб (балки, лаги, детали машин, мебели, тары и т. п.).



#### § 24. Прочность древесины при сдвиге

Установить предельные касательные напряжения древесины в условиях чистого сдвига довольно сложно. Поэтому для инженерных расчетов получают данные путем более простых испытаний на сдвиг. К образцу прикладывают две равные и противоположно направленные силы, вызывающие разрушение в параллельной им плоскости. Различают три вида испытаний на сдвиг: скальвание вдоль волокон, скальвание поперек волокон и перерезание древесины поперек волокон.

Схемы действия сил при этих испытаниях, а также плоскости разрушения, которые задаются принудительно, показаны на рис. 56. Каждый вид испытаний на сдвиг может быть проведен не только в радиальном, как показано на схемах, но и в тангенциальном направлении.

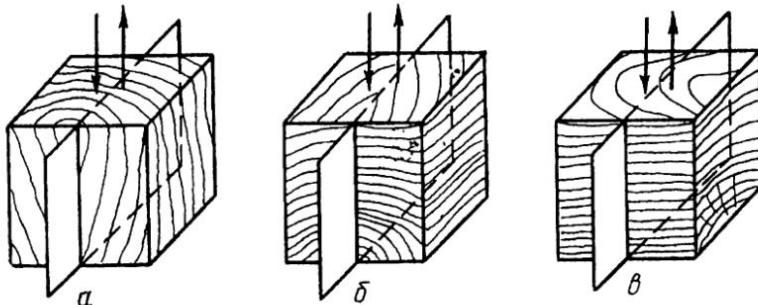


Рис. 56. Случаи сдвига древесины:  
а – скальвание вдоль волокон; б – скальвание поперек волокон; в – перерезание древесины поперек волокон

Для испытания древесины на скальвание вдоль волокон разными исследователями у нас и за рубежом было предложено около 30 типов образцов. Как показали сравнительные исследования акад. Ф.П. Белянкина, условию разрушения преимущественно от касательных напряже-

ний лучше всех отвечает образец, предложенный Л.М. Перелыгиным и рекомендуемый ныне действующим стандартом.

Форма и размеры образца, применяемого для этого вида испытаний, показана на рис. 57, а. Здесь изображен образец для испытания на скальвание вдоль волокон в тангенциальной плоскости; такой же формы образец, но с другим расположением годичных слоев, применяется для скальвания в радиальной плоскости. После измерения фактической толщины образца  $b$  и длины ожидаемой площадки скальвания  $l$  с погрешностью не более 0,1 мм его помещают в приспособление (рис. 58).

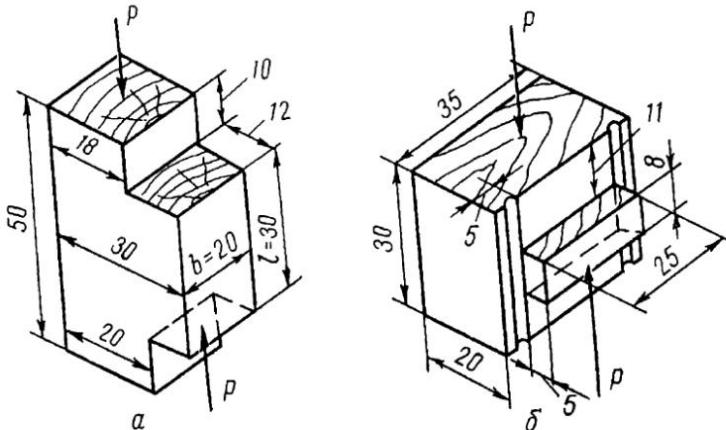


Рис. 57. Образцы для испытаний древесины на скальвание:  
а – вдоль волокон; б – поперек волокон

Образец б располагают таким образом, чтобы его длинная часть плотно прилегала к подвижной планке 4. При этом узкий выступ (ширина 18 мм) образца должен находиться вверху. Разница в ширине выступов необходима для исключения погрешностей вследствие возможного наклона волокон. Опору 7 винтом 8 перемещают настолько, чтобы она плотно прилегала к вертикальной плоскости образца в этом месте и на нее опирался нижний конец короткой части образца.

При испытаниях образец нагружают через нажимную призму 5 с шаровой опорой. Для уменьшения влияния трения, согласно ныне действующему стандарту, между вертикальными плоскостями образца и корпуса 1 приспособления предусмотрена подвижная планка 4 на роликовых опорах 3.

Продолжительность нагружения должна быть 0,5 – 1,5 мин. Определив максимальную нагрузку  $P_{\max}$ , Н, вычисляют предел прочности с округлением до 0,1 МПа по формуле

$$\tau_w = \frac{P_{\max}}{bl}. \quad (91)$$