

Б.Н. Уголев

---

# ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

С ОСНОВАМИ ЛЕСНОГО  
ТОВАРОВЕДЕНИЯ

---



A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. L. ...' with a stylized flourish at the end.

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЛЕСА»

Б. Н. Уголев

## **ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ С ОСНОВАМИ ЛЕСНОГО ТОВАРОВЕДЕНИЯ**

Допущено Министерством образования Российской Федерации  
в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по направлениям  
подготовки бакалавров «Лесное дело» и «Технология и оборудование  
лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств»  
и направлениям подготовки дипломированных специалистов  
«Лесное хозяйство и ландшафтное строительство» и «Технология  
лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств»

4-е издание

# Shadowlabs



Москва  
Издательство Московского государственного университета леса  
2005

УДК 630\*81.001.5(075.8)

У26

Рецензенты: проректор кафедры древесиноведения и фитопатологии  
С.-Петербургской государственной лесотехнической  
академии, доктор сельскохозяйственных наук  
О. И. Полубояринов;

зав. кафедрой древесиноведения и тепловой обработки  
древесины Архангельского государственного технического  
университета, профессор, доктор технических наук  
В. И. Мелехов.

**Уголев, Б. Н.**

У26 Древесиноведение с основами лесного товароведения : учебник для  
лесотехнических вузов. – 4-е изд. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. – 340 с.

ISBN 5-8135-0045-6

В учебнике изложены сведения о строении древесины и коры, их химических свойствах и продуктах переработки. Рассмотрены методы испытаний и показатели физико-механических свойств, пороки, стойкость и характеристики древесины основных пород. Освещены вопросы классификации и стандартизации лесных товаров: даны характеристики лесоматериалов, пилопродукции, композиционных древесных материалов.

УДК 630\*81.001.5(075.8)

ISBN 5-8135-0045-6

© Уголев Б. Н., 2001

© ГОУ ВПО МГУЛ, 2005

*Памяти моей жены Лили посвящается*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Впервые учебник был опубликован в 1975 г. Второе его издание вышло в свет в 1986 г. Прошедший, довольно продолжительный, период использования учебника в вузовской педагогической практике показал, что он в достаточной мере удовлетворяет требованиям древесиноведческой подготовки специалистов. Он служит основой для лекционных курсов разного объема и представляет возможности для самостоятельной работы студентов.

Вместе с тем, многолетний преподавательский опыт автора позволяет критически оценить предыдущие издания учебника. При подготовке третьего издания в основном сохранена оправдавшая себя структура учебника. Однако содержание подверглось существенной переработке, особенно в товароведческом разделе. Учебник дополнен новейшими сведениями. Объем книги значительно сокращен за счет исключения устаревшего материала и некоторых подробностей, использования более лаконичных формулировок. При этом информативность учебника не пострадала. В необходимых случаях сделаны ссылки на литературу. Весьма обширный список литературы существенно обновлен. Здесь сохранены классические работы, приведены новейшие зарубежные учебники по древесиноведению, монографии.

Учебник написан в соответствии с программой дисциплины «Древесиноведение. Лесное товароведение» (специальность 2602.00), рассчитанной на наибольшее количество часов по сравнению с дисциплинами этого профиля по другим специальностям. Учебник предназначен также для изучения древесиноведения и лесного товароведения по программам дисциплин, предусмотренных учебными планами специальностей 2601.00, 2603.00, 2604.00, 1704.00, 2102.00, 0229.00, 0605.00, 0606.00, 0608.00, 0305.00.

В книге содержатся сведения, которые могут быть полезными для инженерно-технических работников лесной, деревообрабатывающей и других отраслей промышленности, а также лесного хозяйства.

Считаю своим приятным долгом выразить благодарность проф. И.П. Дейнеко за ценные замечания и дополнения по главе "Химические свойства древесины и коры", а также доц. Я.Н. Станко за внимательный просмотр рукописи и вычитку всей книги.

Отзывы и пожелания просим высылать по адресу: 141005. Мытищи-5. Московская обл., 1-я Институтская, 1, МГУЛ.

## ВВЕДЕНИЕ

Лесной покров земли занимает около одной пятой суши. Принято выделять лесные зоны умеренного пояса, включающие бореальные (северные) хвойные, широколиственные и смешанные леса; зоны тропического и субтропического поясов [40, 37].

Экологическое значение леса трудно переоценить. Половина вдыхаемого человеком кислорода образуется лесными растениями. Леса – крупнейший поглотитель и накопитель углерода, содержание которого в атмосфере в виде углекислого газа непрерывно возрастает, угрожая из-за парникового эффекта повышением среднеглобальной температуры. Леса играют важную роль в сохранении необходимого разнообразия биологических видов. Древесные растения вырабатывают биомассу, необходимую для существования всего живого на земле.

Как важнейшая часть биосферы лес, аккумулируя солнечную энергию, влияет на климат, круговорот воды в природе. Лес регулирует запасы воды в почве, защищает ее от эрозии, суховеев, пыльных бурь. Он выполняет оздоровительные и санитарно-гигиенические функции. Непрерывно возрастает рекреационное значение лесов как места отдыха и туризма. Многие полезности извлекают из растущего, живого леса. Не менее важное значение имеет заготовка древесины и других продуктов при сборе лесного урожая.

С давних пор человек познал и оценил достоинства древесины, которая удовлетворяла его разнообразные нужды – служила строительным, подлочным материалом и топливом. В наше время, благодаря успехам науки и техники, разработано и широко используется множество искусственных конструкционных и технологических материалов. Однако древесина не утратила своего значения. Потребление древесины во всем мире неуклонно растет.

Мировые запасы древесины по последним данным ФАО составляет около 380 млрд. м<sup>3</sup>, в том числе примерно 1/3 хвойных пород. Лесопокрытая площадь планеты равна 3,4 млрд. га. Леса распределены неравномерно и запасы в Америке составляют примерно половину мировых (причем в Латинской Америке они вдвое больше, чем в Северной Америке). На долю Азии (без России) приходится примерно седьмая часть запасов, несколько меньше – в Африке. Запасы в Европе (без России) равны примерно 4 %, а в Австралии и Океании – менее 2 %.

Россия – крупнейшая лесная держава, ее лесопокрытая площадь составляет 774 млн. га, а запасы древесины – 82 млрд. м<sup>3</sup>, в том числе 4/5 хвойных пород [39]. Это означает, что на долю России приходится более 1/5 лесопокрытой площади планеты и мировых запасов древесины, в том числе почти половина запасов наиболее ценной древесины хвойных пород.

Практически нет такой отрасли народного хозяйства, которая не потребляла бы древесину. Многообразное использование ее объясняется редкостным сочетанием в этом продукте живой природы многих ценных свойств. Древесина представляет собой прочный и одновременно легкий материал, обладающий хорошими теплоизоляционными свойствами, способностью без разрушения поглощать работу при ударных нагрузках, гасить вибрации. Она легко обрабатывается режущими инструментами, склеивается, удерживает металлические и другие крепления. Древесина имеет прекрасные декоративные свойства; ей присуща уникальная резонансная способность. Эти природные особенности древесины позволяют использовать ее для производства строительных деталей и конструкций, мебели и музыкальных инструментов, тары и спортивного инвентаря, в качестве шпал, крепи для угольной, сланцевой и горнорудной промышленности, а также для многих других целей.

Однако материалы, получаемые из древесины чисто механическим путем, имеют недостатки. Они вызваны тем, что древесине присущи: изменчивость свойств, неоднородность строения, анизотропия, наличие пороков, способность усыхать, разбухать, коробиться и растрескиваться, загнивать и возгораться. Перечисленные недостатки в значительной мере устраняются путем химической и химико-механической переработки древесины в листовые и плитные материалы – бумагу, картон, древесностружечные и древесноволокнистые плиты, фанеру и др. Композиционные древесные материалы наряду с натуральной древесиной применяются в производстве домов, в судо- и вагоностроении, мебельной промышленности и многих других отраслях народного хозяйства.

Введение в древесину антисептиков, антипиренов, смол, а также пластификация и прессование позволяют улучшить свойства натуральной древесины и получить био- и огнестойкие материалы, обладающие повышенной прочностью, износостойкостью и формоустойчивостью, антифрикционными и другими необходимыми технологическими и эксплуатационными свойствами.

Древесина служит сырьем для выработки множества ценных продуктов: кормовых дрожжей, используемых в сельском хозяйстве; корда для шинной промышленности; искусственных волокон для текстильной промышленности; древесного угля для производства полупроводников; лекарственных препаратов, растворителей, дубителей и т.д. Перечень продуктов, получаемых из древесины (их насчитывается до 20 тыс.), можно было бы продолжать, но и такой краткий обзор дает достаточное представление о значении древесины для народного хозяйства, культуры и быта людей.

Древесина в отличие от нефти, угля и газа относится к восстанавливаемым природным ресурсам. Это неоспоримое преимущество древесного сырья перед ископаемыми ресурсами. Следует также отметить возможность повторного использования древесины.

В условиях ограниченности запасов топлива важное значение приобретает малая энергоемкость получения древесины, которая в несколько раз (а по сравнению, например, с алюминием – десятки раз) ниже, чем у других конструкционных материалов.

Древесина становится сырьем для получения жидкого и газообразного топлива, продукции органического синтеза, кормовых продуктов для сельского хозяйства и в перспективе – продуктов питания.

Немалую роль при оценке древесины как материала будущего играют ее неповторимые эстетические свойства. Неодолимо постоянное стремление человека к общению с этим благородным природным материалом. Древесина – экологически дружелюбный материал. Отработанная древесина легко поддается биологическому разложению и не загрязняет окружающую среду.

Большой спрос на древесину в настоящее время и расширение потребления ее в будущем с особой остротой ставят вопрос о рациональном использовании лесных богатств как о важной части общей проблемы охраны природы. Правовые основы использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов установлены в принятом в 1997 г. "Лесном кодексе РФ". Должна быть разработана, как отмечает Н.А. Моисеев [60], система требований к качеству древесины при лесовыращивании, учитывающая интересы потребителей и производителей основных видов лесопродукции. Эффективное использование древесины опирается на достижения науки и передового опыта и во многом зависит от познания ее фундаментальных свойств.

Комплекс сведений о строении и свойствах древесины, которые получают в результате биологических, химических, физических и механических исследований, содержит непрерывно развивающаяся научная дисциплина *древесиноведение*. В ней сосредоточиваются сведения не только о древесине ствола, но и данные о коре, корнях и кроне дерева. Потребительские качества лесных материалов и продуктов рассматриваются в *лесном товароведении*.

История зарождения и развития отечественного *древесиноведения* как научной дисциплины связана с работами В.В. Петрова (1813), А.Е. Теплоухова (1842), А.В. Гадолина (1873), Д.Н. Кайгородова (1878), П.А. Афанасьева (1879), Н.М. Бурого (1900), Н.А. Филиппова (1912), В.А. Петровского (1913), С.А. Богословского (1915) и других ученых. В этих работах были вскрыты важные закономерности и определены показатели некоторых свойств древесины отдельных пород, а также установлено влияние на них условий произрастания.

В 20-х годах исследования свойств древесины проводили Н.А. Филиппов, Н.Т. Кузнецов, С.И. Ванин, Л.М. Перелыгин, Е.И. Савков. Крупные успехи в развитии *древесиноведения* были достигнуты в 30-х годах. В Институте древесины, из которого впоследствии был выделен Цен-

тральный научно-исследовательский институт механической обработки древесины (ЦНИИМОД), во Всесоюзном институте авиационных материалов (ВИАМ), Центральном научно-исследовательском институте промышленных сооружений (ЦНИИПС), а также в других исследовательских организациях и вузах проводились исследования основных физико-механических свойств древесины лесных пород из различных районов страны. Значительные работы в этой области провели С.И. Ванин, Е.И. Савков, А.Х. Певцов, Н.Н. Чулицкий, Ф.П. Белянкин, Н.Л. Леонтьев, А.И. Кондратьев, Н.Н. Абрамов, А.А. Солнцев, Н.И. Стрекаловский. Особенно велики заслуги Л.М. Перелыгина, разработавшего первый стандарт на методы физико-механических испытаний древесины. Исследования пороков древесины, которые также завершились созданием стандарта, проводились в ЦНИИМОДе (А.Т. Вакин, В.В. Миллер, Е.И. Мейер и др.). Строение древесины и коры изучали Л.А. Иванов, Л.М. Перелыгин, И.С. Мелехов и др.

В 40–60-х годах важные исследования по физическим и механическим свойствам древесины провели Ю.М. Иванов, Ф.П. Белянкин, Н.Л. Леонтьев, А.Н. Митинский, П.Н. Хухрянский, П.С. Серговский, В.А. Баженов, В.Н. Быковский; по анатомии древесины – А.А. Яценко-Хмелевский, В.Е. Вихров, В.Е. Москалева; в области пороков и хранения древесины – А.Т. Вакин, С.Н. Горшин, Ф.И. Коперин и др.

В 70–80-х годах ценные работы были выполнены в Институте леса и древесины им. В.Н. Сукачева (ИЛД) в Красноярске – по тепловым и влажностным свойствам древесины (Б.С. Чудинов); плотности (Л.Н. Исаева) и проницаемости древесины жидкостями и газами (Е.В. Харук); в Лесотехнической академии (ЛТА) – по анизотропии упругих свойств и прочности древесины (Е.К. Ашкенази); плотности, порокам древесины, биологическим основам ее защиты; квалитметрии древесного сырья (О.И. Полу-бояринов, Д.В. Соколов, А.Л. Синькевич, В.А. Соловьев); ботанической анатомии древесины (А.А. Яценко-Хмелевский, М.И. Колосова); в ЦНИИМОДе – по стандартизации методов испытаний древесины и пиломатериалов (А.М. Боровиков и др.); в Сенежской лаборатории консервирования древесины – по определению биостойкости древесины (С.Н. Горшин, И.А. Чернцов); анатомии древесины, пораженной грибами (И.Г. Крапивина); в Центральном научно-исследовательском институте бумаги (ЦНИИБ) – по технической анатомии древесины (В.Е. Москалева, З.Е. Брянцева, Е.В. Гончарова); в Институте горного лесоводства – по закономерностям деятельности камбия, формированию структуры и свойств древесины кавказских пород (Э.Д. Лобжанидзе); в Институте химии древесины (Рига) – по строению и топохимии клеточной стенки (В.С. Громов, П.П. Эриньш); свойствам модифицированной древесины (К.А. Роценс и др.), в Ботаническом институте им. В.А. Комарова – по морфологии и ди-

агностике древесины хвойных пород (Е.С. Чавчавадзе), а также в ряде других организаций.

В Московском лесотехническом институте (МЛТИ) автором и под его руководством в 50-80-х годах были проведены исследования деформативности, реологических свойств, внутренних напряжений (Ю.Г. Лапшин, Э.Б. Щедрина, М.В. Николайчук, В.И. Пименова, Х.А. Фахретдинов и др.), неразрушающих ультразвуковых методов контроля (В.Д. Никишов), акустических свойств (И.И. Пищик), усушки и разбухания древесины (В.П. Галкин) и др. Были также исследованы влагопроводность (П.С. Серговский), теплофизические свойства (Г.С. Шубин), проницаемость (А.И. Расев), свойства древесины как конструкционного материала (Ю.С. Соболев), процессы формирования древесины карельской березы (А.А. Любавская, В.В. Коровин).

В 90-х годах продолжались исследования в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО АН РАН – по дендрохронологии (Е.А. Ваганов); термодинамике взаимодействия древесины с органическими растворителями (С.Р. Лоскутов); физиологии, морфогенным и биохимическим аспектам формирования древесины (Н.Е. Судачкова, Г.Ф. Антонова); экологической анатомии (В.Е. Бенькова), в Ботаническом институте им. В.Л. Комарова РАН – комплексному эколого-анатомическому анализу древесных растений, строению резонансной древесины (Е.С. Чавчавадзе), в Санкт-Петербургской лесотехнической академии – биологическому древесиноведению (О.И. Полубояринов, А.М. Сорокин и др.), модификации древесины (В.И. Пятакин), в Институте леса КНЦ РАН – биохимии аномальных образований древесины (Л.Л. Новицкая), мониторингу памятников деревянного зодчества (В.А. Козлов, М.В. Кистерная), в Научно-исследовательском институте лесной генетики и селекции – формированию структуры и технических свойств различных типов древесины (Н.Е. Косиченко), селекции на качество древесины (В.К. Ширнин); в Марийском государственном техническом университете – строению, свойствам и порокам древесины пород Среднего Поволжья (В.И. Пчелин, И.А. Алексеев), резонансным свойствам древесины (В.И. Федюков, А.А. Колесникова), моделированию формы ствола деревьев (П.М. Мазуркин), в Архангельском государственном техническом университете – механической деструкции древесины (В.И. Мелехов), в Воронежской государственной лесотехнической академии – влажностным свойствам (Т.К. Курьянова, И.Н. Вариводина) и дизлектрическим свойствам (А.Л. Гутман, А.Ю. Даниленко) мореного дуба; в Сибирском государственном технологическом университете – свойствам древесины лиственницы (Е.В. Харук), проницаемости древесины (В.Н. Ермолин); в Уральской лесотехнической академии – влиянию сушки на качество древесины (В.В. Сергеев), биологическим повреждениям древесины (Д.А. Беленков); в Брянской инженерно-технологической академии – качеству древесины (В.Н. Поляков); в Новосибирском государственном архи-

тектурно-строительном университете – стойкости модифицированной древесины (В.М Хрулев, Н.А. Машкин).

В Московском государственном университете леса (МГУЛ, быв. МЛТИ) под руководством автора продолжались исследования деформационных превращений и сушильных напряжений в древесине, гигроусталости (Н.В. Скуратов, Г.А. Горбачева), свойств топяковой древесины (Я.Н. Станко, Л.В. Поповкина). Были также исследованы свойства поверхности древесины (В.Г. Санаев). Продолжались исследования по экологии насекомых – разрушителей древесины (Е.Г. Мозолевская) и др.

Проводились также исследования модифицированной древесины в Московском государственном строительном университете (Е.Н. Покровская) и других организациях; долговечности деревянных конструкций – в Центральном институте строительных конструкций (Л.М. Ковальчук), ЦНИИМОД (Ю.А. Варфоломеев) и др.

В 1968 г. был создан Координационный совет по современным проблемам древесиноведения при Институте леса и древесины им. В.Н. Сукачева в Красноярске (председатель Б.С. Чудинов). С 1990 г. этот совет функционирует при МГУЛ (председатель Б.Н. Уголев) и с 1991 г. находится под эгидой Международной академии наук о древесине (ИАВС). В Региональный Координационный совет по древесиноведению (РКСД) входит 50 ученых из России, а также из Белоруссии (Н.И. Федоров), Болгарии (Г. Блыскава), Венгрии (Ш. Мольнар), Грузии (Э.Д. Лобжанидзе), Латвии (К. Роценс, Я. Долацис), Польши (Л. Хелинска-Рачковская), Словакии (С. Курятко), Украины (В.П. Рябчук, П.В. Билей, Е.А. Пинчевская и др.), Эстонии (Т. Капс). Совет проводит ежегодные выездные сессии в разных городах России. РКСД организовал три крупных международных симпозиума "Строение, свойства и качество древесины" в Москве-Мытищах (1990 г.), Москве (1996 г.), Петрозаводске (2000 г.). В изданных трудах симпозиумов [60] содержатся результаты исследований в области фундаментального и прикладного древесиноведения, намечены перспективные направления их развития. При РКСД в 1997 г. организован эффективно действующий Реестр экспертов высшей квалификации в области древесиноведения, лесного товароведения и сопредельных технологических дисциплин.

В качестве самостоятельной учебной дисциплины древесиноведение оформилось в 1932 г., когда в вузах были открыты соответствующие кафедры. В 1934 г. С.И. Ванин написал учебник по древесиноведению, который переиздавался в 1940 и 1949 гг.

Непрерывно возрастающий объем знаний о древесине находил отражение в таких руководствах и учебниках, как "Механические свойства и испытания древесины" (Л.М. Перелыгин и А.Х. Певцов, 1934), "Альбом пороков древесины" (В.В. Миллер и А.Т. Вакин, 1938), "Древесиноведение" (Л.М. Перелыгин, 1949, 1954, 1957 и посмертные переиздания в 1960,

1969 и 1971 гг.), "Строение древесины" (Л.М. Перелыгин, 1954), "Основы и методы анатомического исследования древесины" (А.А. Яценко-Хмельевский, 1954), "Строение древесины и его изменение при физических и механических воздействиях" (В.Е. Москалева, 1957), "Диагностические признаки древесины главнейших лесохозяйственных и лесопромышленных пород" (В.Е. Вихров, 1959), "Древесина. Показатели физико-механических свойств. РТМ" (Н.Л. Леонтьев, 1962), "Испытания древесины и древесных материалов" (Б.Н. Уголев, 1965), "Альбом пороков древесины" (А.Т. Вакин, О.И. Полубояринов, В.А. Соловьев, 1969), "Техника испытаний древесины" (Н.Л. Леонтьев, 1970).

Систематизированные сведения о лесных товарах приводятся в изданных в разные годы руководствах и учебниках: "Лесное товароведение" А. Белилина (1931 г.), А.И. Кузнецова (1932, 1934, 1940 гг.), С.Я. Лапирова-Скобло и А.Ф. Тиайна (1933 г.), С.Я. Лапирова-Скобло (1950, 1959 и посмертное издание в 1968 г.), А.С. Ярмолинского, П.Л. Калашникова, В.Д. Бахтеярова (1972 г.).

Этот краткий перечень литературы охватывает период, предшествующий выходу первого издания учебника. За последующее время появился еще ряд крупных работ, которые отражены в приведенном списке литературы.

При изучении комплексной дисциплины "Древесиноведение и лесное товароведение" студент должен получить сведения о строении дерева и древесины; химических, физических и механических свойствах древесины; их изменчивости и взаимосвязи; пороках древесины; природной стойкости и способах ее повышения; характерных особенностях древесины различных пород; классификации, стандартизации и квалиметрии лесных товаров; потребительских свойствах лесных товаров и методах их испытаний. Таким образом, данная дисциплина является базовой, на которую опираются последующие технологические дисциплины всех лесотехнических специальностей. Приобретенные знания в указанных областях должны способствовать активной инженерно-исследовательской деятельности специалистов на производстве.

## РАЗДЕЛ I. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

### ГЛАВА 1. СТРОЕНИЕ ДЕРЕВА

#### § 1. Древесные растения

Весь растительный мир делится на низшие и высшие растения, для которых характерно наличие корня, стебля и листьев. В зеленых листьях из углерода, поглощаемого из воздуха в виде углекислоты, и воды, поступающей из почвы через корни и стебель, на свету совершается фотосинтез – процесс образования сложных органических веществ. Кроме того, происходят и другие физиологические процессы, необходимые для роста и развития растений: дыхание, питание, превращение и передвижение питательных веществ, транспирация (испарение воды) и др.

К древесным растениям, представляющим собой жизненную форму высших растений, относятся деревья, кустарники и лианы. В древесиноведении рассматриваются преимущественно деревья.

Взрослое дерево имеет ствол, крону и корни (рис. 1,а). Корневая система включает мелкие корешки, всасывающие воду с растворенными в ней минеральными веществами, и толстые корни, которые удерживают дерево в вертикальном положении, проводят воду и хранят запасы питательных веществ.

Ствол связывает корневую систему с кроной дерева, представляющей собой совокупность ветвей и листьев. По определенным зонам ствола перемещаются в восходящем токе водные растворы минеральных веществ из почвы, а в нисходящем – растворы органических веществ, выработанных в листьях. В стволе также хранятся запасные питательные вещества. В процессе роста дерева ствол приобретает конусообразную форму, происходит удлинение ствола в верхушечной точке роста и ежегодное увеличение диаметра вследствие деятельности камбия. Камбий – это живая образовательная ткань. В умеренном климатическом поясе наибольшая его активность наблюдается весной и летом. Зимой камбий бездействует. Этим обуславливается слоистое строение ствола дерева.

На рис. 1,б показан процесс развития хвойного дерева из семени и схема строения ствола дерева в возрасте 13 лет. По мере роста дерева ежегодно как бы на стержень надевается полый конус. На рис. 1,б изображена лишь часть ствола. На нижнем поперечном срезе можно обнаружить 10 концентрических полуокружностей (границы годичных приростов), а на верхнем таком же срезе их только 5. Следовательно, потребовалось соответственно 3 года и 8 лет для того, чтобы дерево достигло той высоты, на которой сделан нижний и верхний поперечные срезы. Ветви и корни дерева формируются так же, как и ствол.

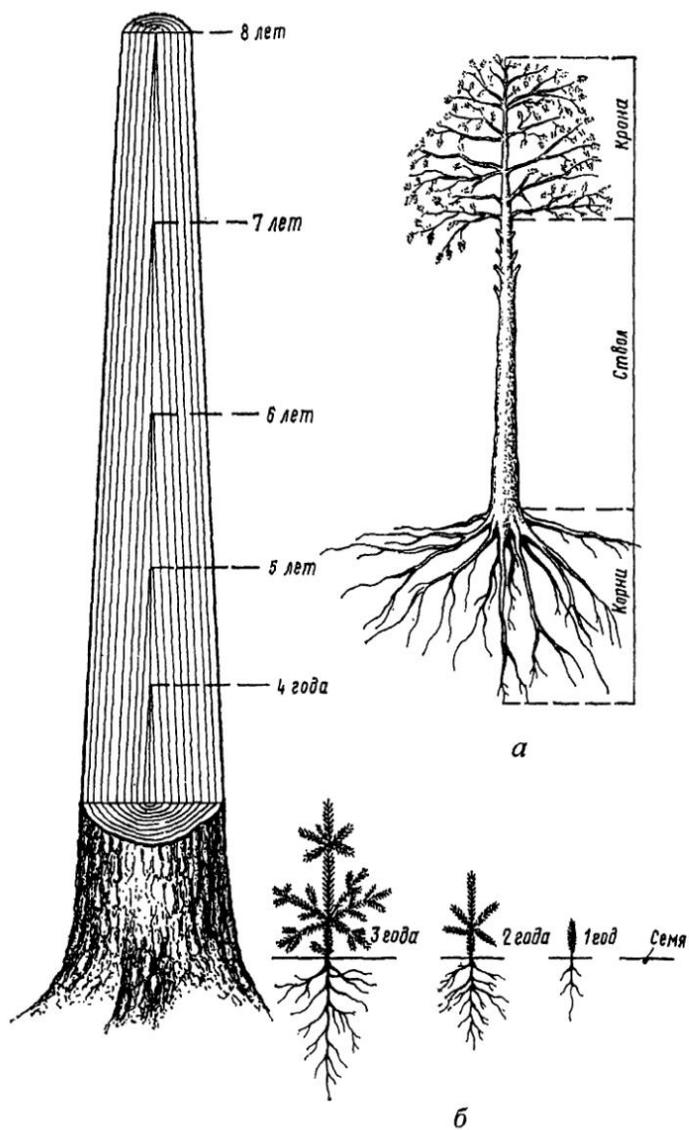


Рис. 1. Части растущего дерева и схема формирования ствола:  
 а – растущее дерево; б – схема формирования ствола у 13-летнего хвойного дерева

По ботанической классификации хвойные и лиственные деревья входят в два отдела семенных растений – голосеменных и покрытосеменных. К первым, у которых семена лежат открыто на поверхности семенных чешуй, относится подкласс хвойных; они характеризуются своеобразной формой листьев – игольчатой или чешуйчатой хвоей. Это в большинстве своем вечнозеленые смолистые растения. Ко второму отделу отнесены древесные растения, у которых семяпочки развиваются в завязи пестика. При созревании семян из завязи образуется плод, защищающий семена от внешних воздействий. Листья покрытосеменных представляют собой пластины с разветвленным жилкованием. У большинства растений листья перед наступлением зимы опадают. Большинство лиственных деревьев по числу семядолей принадлежит к классу двудольных, за исключением пальм и бамбука, которые относятся к однодольным растениям.

Как известно из систематики растений, классы и подклассы состоят из семейств, а они, в свою очередь, объединяют в себе роды, в которых собраны сходные виды. Каждое растение имеет ботаническое название, которое дается на двух языках – русском и латинском с указанием рода и вида.

Например, в названии "сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.)" имя существительное (на латинском языке пишется с большой буквы) указывает род, а имя прилагательное – вид. Кроме того, в научной литературе принято после латинского видового названия ставить начальную букву фамилии автора, впервые описавшего этот вид; в данном примере стоит буква L., что означает Линней. Сосна обыкновенная входит в семейство сосновых (*Pinaceae*).

Ниже будут рассматриваться в основном особенности строения и свойства, характерные для древесных растений определенного рода (сосны, дуба и др.), а иногда отдельного вида (сосна обыкновенная, дуб черешчатый и др.). В этом смысле следует понимать употребляемые выражения "древесная порода" или просто "порода". Кроме ботанических названий пород в практике часто используют торговые названия.

## § 2. Основные части дерева

Дерево, как известно, состоит из ствола, корней и кроны. Относительный ориентировочный объем этих составных частей в деревьях разных пород приведен в табл. 1 [49]. Как видим, более половины объема дерева приходится на ствол.

### 1. Относительный объем частей дерева

Порода	Объем частей дерева, %			Порода	Объем частей дерева, %		
	Ствол	Корни	Ветви		Ствол	Корни	Ветви
Лиственница	77–82	12–15	6–8	Береза	78–90	5–12	5–10
Сосна	65–77	15–25	8–10	Бук	55–70	20–25	10–20
Ясень	55–70	15–25	15–20	Клен	65–75	15–20	10–15

**Ствол.** Реальная форма ствола представляет собой тело, образованное вращением вокруг вертикальной оси некоторой кривой. Д.И. Менделеев полагал возможным в качестве образующей принимать кубическую параболу. При более детальном описании формы ствола обычно указывают, что в нижней части он близок к нейлоиду – телу, образованному вращением вогнутой кривой – параболы Нейля. На большом протяжении ствол имеет форму выпуклого параболоида второго порядка и на отдельных коротких участках приближается к цилиндру. Только верхняя часть ствола по форме близка к конусу. Весь ствол по форме напоминает брус равного сопротивления, что позволяет ему выдерживать большие нагрузки от собственной массы дерева и ветровых усилий.

Ствол изучают на трех главных разрезах: поперечном и двух продольных – радиальном и тангенциальном (рис. 2). Плоскость поперечного, или торцового, разреза перпендикулярна оси ствола. Плоскость одного из продольных разрезов проходит через сердцевину ствола по радиусу торца – радиальный разрез, плоскость другого разреза – тангенциального – направлена по касательной к окружностям, образованным слоями годичного прироста (см. рис. 1). На поперечном разрезе можно указать радиальные и тангенциальные направления, а на продольных разрезах направления: вдоль волокон и радиальное или тангенциальное.

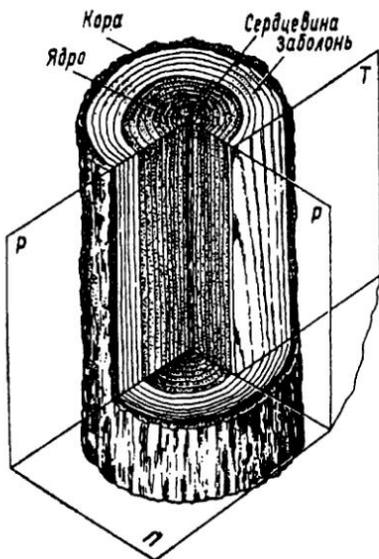


Рис. 2. Основные части ствола и главные разрезы:  
П – поперечный; Р – радиальный; Т – тангенциальный

Основные анатомические части ствола легко обнаружить на его поперечном разрезе. Наружная часть – кора – резко отличается по внешнему виду от следующей за ней древесины. Древесина окружает очень небольшую центральную зону – сердцевину. Расположенный между древесиной и корой тонкий слой камбия для простого глаза незаметен.

Сердцевина сравнительно редко находится в геометрическом центре сечения ствола, обычно она более или менее смещена от него.

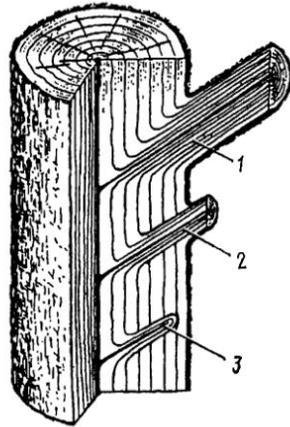
Диаметр сердцевины большей частью колеблется в пределах 2–5 мм (у бузины достигает 1 см). У многих пород сердцевина округлая или овальная, у

ольхи – пятиугольная, у дуба – звездчатая [16]. На продольном радиальном разрезе сердцевина имеет вид узкой коричневой полоски – прямой у хвойных и извилистой у лиственных пород.

Древесина занимает зону, диаметр которой в зависимости от породы, возраста дерева и условий его произрастания изменяется в очень широких пределах – примерно от 6 – 8 до 100 см и даже более. Форма поперечного сечения ствола и, следовательно, древесины чаще всего близка к окружности, но иногда сечение приобретает эллипсовидную форму. Диаметр уменьшается по высоте ствола, причем уменьшение на единицу длины ствола (сбег) выражено сильнее у деревьев, выросших не в густом лесу, а на свободе.

Древесину, особенно в верхней части ствола, пронизывают сучки, представляющие собой остатки ветвей. Если ветвь живая, прирост древесины происходит одновременно и на стволе, и на ветви. Слои годичного прироста ствола переходят в слои ветви, окружая ее сердцевину, связанную с сердцевиной ствола (рис. 3). Такая ветвь в срубленном дереве составляет сучок, вполне сросшийся с древесиной ствола. При отмирании ветви прирост древесины происходит только на стволе, связь между древесиной ствола и ветви нарушается, и основание ветви постепенно зарастает. Так образуются сначала зарастающие, а затем и глубоко заросшие сучки.

Рис. 3. Схема образования сучков:  
1 – сучок от живой ветви; 2 – зарастающий сучок от отмершей ветви; 3 – заросший сучок



По степени зарастания и размерам сучков в стволе дерева, выросшего в насаждении, можно выделить три зоны: нижнюю (комлевую), где у сердцевины расположены мелкие и глубоко заросшие сучки, на поверхности ствола незаметные; среднюю зону с более крупными заросшими сучками и на поверхности ствола часто заметными по бугрообразным утолщениям, а ближе к кроне – зарастающими, т.е. еще выходящими наружу; верхнюю, или зону живой кроны, от ветвей которой остаются крупные сучки. В зависимости от разреза ствола сучки имеют разную форму.

Сучки нарушают однородность строения древесины и являются самым распространенным ее пороком.

Кора на поперечном разрезе ствола имеет форму обычно темно-окрашенного кольца (см. рис. 2). В толстой коре взрослых деревьев можно

различить два слоя: наружный – корку (его назначение – предохранять живые ткани ствола от резких колебаний температуры, испарения влаги, проникновения грибов, бактерий и механических повреждений) и внутренний слой – луб, непосредственно прилегающий к камбию. В растущем дереве луб проводит вниз по стволу образующиеся в листьях органические питательные вещества.

У молодых деревьев кора гладкая, иногда покрыта тонкими опадающими чешуями; при утолщении ствола в коре появляются трещины, которые с возрастом дерева углубляются. По характеру поверхности различают кору гладкую (пихта), бороздчатую (ясень), чешуйчатую (сосна), волокнистую (можжевельник) и бородавчатую (бересклет).

Цвет коры снаружи изменяется в широких пределах: от белого (береза), светло-серого (пихта), зеленовато-серого (осина) до серого (ясень), темно-серого (дуб) или темно-бурого (ель). С каждым годом толщина коры увеличивается. Однако вследствие малой величины годичного прироста и постепенного отпада наружных слоев в виде чешуй кора никогда не достигает такой толщины, как древесина. Относительный объем коры в стволе (без сучьев) для основных пород согласно данным Н.П. Анучина приведен в табл. 2.

## 2. Относительный объем коры в стволе

Порода	Объем коры, %	Порода	Объем коры, %
Лиственница	22–25	Дуб	14–21
Сосна	10–16	Бук	7–11
Ель	6–13	Береза	13–15
Кедр	6–10	Липа	12–16
Пихта	11–19	Осина	11–20

С возрастом дерева относительный объем коры снижается, а с ухудшением условий произрастания, наоборот, повышается. Доля коры в объеме ствола уменьшается с увеличением диаметра ствола. Толщина коры уменьшается от комля к вершине ствола.

**Крона и корни.** Значительная доля биомассы дерева приходится на крону и корни растущего дерева. С ухудшением условий произрастания эта доля увеличивается.

Крона включает ветви и сучья, представляющие собой живые или отмершие боковые побеги дерева. Ветви (сучья) имеют такое же строение, как и ствол. Доля коры в сучьях намного больше, чем в стволах. Количество коры в сучьях уменьшается с увеличением их диаметра. Кора на сучьях гладкая, тонкая и состоит в основном (до 90 %) из луба. Плотность и механические свойства древесины ветвей (сучьев) несколько выше, чем у древесины ствола. Особенно заметно увеличение твердости у основания сучьев.

## ГЛАВА 2. СТРОЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ

В зависимости от поставленных целей исследование строения древесины, а также коры, проводят с разных позиций. Кроме традиционной ботанической анатомии в последние десятилетия успешно развивается техническая анатомия древесины как материала для промышленного использования.

Анатомические исследования древесины обеспечивают получение сведений, необходимых для определения пород, позволяющих вскрыть структурную основу свойств древесины и наметить пути их направленного изменения в растущем дереве; создают предпосылки для модифицирования древесины и разработки эффективных технологических процессов ее переработки; дают возможность разрабатывать методы испытаний древесины, учитывающие особенности ее структуры.

Древесину исследуют на разных уровнях, различая ее макростроение, микростроение, а также ультратонкое строение.

### § 3. Макроскопическое строение древесины

**Заболонь и ядро.** На поперечном разрезе ствола многих пород в древесине выделяется темноокрашенная центральная зона – **ядро** и светлая наружная – **заболонь** (см. рис. 2).

У деревьев всех пород в раннем возрасте древесина состоит только из заболони и лишь с течением времени происходит отмирание живых элементов древесины, закупорка водопроводящих путей и отложение экстрактивных веществ в центральной зоне. При этом у одних пород происходит интенсивное изменение цвета указанной зоны древесины – она приобретает темную окраску, т. е. образуется ядро. Такие породы называют **дровыми**.

У других пород отмирание центральной части древесины не сопровождается ее потемнением. Породы с однородной окраской всей древесины принято называть **безъядровыми**. Среди группы безъядровых пород есть такие, у которых центральная зона в растущем дереве имеет меньшую влажность, чем периферическая. Тогда эту зону называют **спелой древесиной**, а породы этой группы – **спелодревесными**. Имеются также породы, в которых центральная часть не отличается от периферической ни по цвету, ни по содержанию воды; такие породы называют **заболонными**.

Указанное деление пород давно укоренилось в древесиноведческой литературе. Однако у нас [14, 15] и за рубежом [81] все больше распространяется представление о том, что ядро образуется у всех пород, только у одних темная окраска его возникает всегда или при определенных условиях, а у остальных – оно остается светлым. Следовательно спелая древесина – неокрашенное ядро.

Тем не менее для целей определения пород по внешнему виду древесины целесообразно сохранить деление пород на ядровые и безъядровые. Из хвойных пород к ядровым относятся: лиственница, сосна, кедр<sup>1</sup>, можжевельник и тис, к безъядровым (спелодревесным) – ель и пихта.

Среди лиственных пород ядровые – дуб, ясень, вяз, ильм, грецкий орех, ива, тополь и др. Заболонные породы – береза, ольха, клен, липа и др.; спелодревесные – бук, осина и др. На срезах древесины граница между заболонью и ядром видна четко (лиственница) или заметна слабо (кедр).

Ширина заболони у разных пород различная, она зависит от того, как рано начало образовываться ядро. Например, у белой акации образование ядра начинается уже на 3-й год, а у сосны в 30 – 35 лет, поэтому у белой акации ширина заболони всего лишь несколько миллиметров, а заболонь сосны примерно в 10 раз шире. С возрастом площадь сечения ствола, занятая заболонью, уменьшается. У растущих деревьев сосны наличие широкой заболони можно предсказать по коре, в этом случае гладкой, небольшой толщины, с малыми и тонкими чешуйками. На поперечном разрезе ствола у той стороны, которая несет более крупные ветви, ширина заболони больше, чем у противоположной.

По высоте ствола ширина заболони у сосны и ели уменьшается, т. е. в нижней части она наибольшая. У дуба, по данным В.Е. Вихрова, ширина заболони по высоте ствола почти не меняется, в то же время доля площади поперечного сечения ствола, приходящаяся на заболонь, увеличивается вверх по стволу.

С уменьшением влажности почвы (в разных типах леса) у дуба позднее образуется ядро и больше ширина заболони. Ухудшение условий произрастания приводит к повышению относительного содержания заболони и у сосны.

Ширина заболони зависит также от степени развития деревьев. Например, для сосны из Московской области установлено [49] уменьшение ширины заболони при переходе от деревьев сильного роста (I класс) к деревьям с замедленным ростом (II и III классы).

В ветвях происходит такой же процесс ядрообразования, как и в стволе. Поэтому древесина сучков от молодых живых ветвей в верхней части кроны состоит из одной заболони. Сучки от ветвей из нижней части кроны содержат ядровую зону, а основания уже отмерших ветвей состоят сплошь из ядра (или спелой древесины).

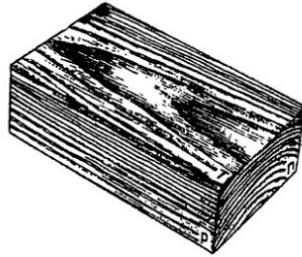
**Годичные слои.** Ежегодный прирост древесины называется годичным слоем. На поперечном разрезе (рис. 4) годичные слои образуют концентрические окружности. У некоторых пород они имеют волни-

---

<sup>1</sup> Здесь и далее вместо полных ботанических названий "сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.)" и "сосна кедровая (*Pinus sibirica* Du Tour)" используются сокращенные названия соответственно: сосна и кедр.

стый вид, например у граба, тиса, можжевельника; у бука и ольхи граница между годичными слоями в местах пересечения ее широкими сердцевинными лучами (см. далее) загибается внутрь (к сердцевине), что также придает слоям волнистые очертания.

Рис. 4. Вид годичных слоев на главных разрезах: ранняя (светлая) и поздняя (темная) древесина годичных слоев на поперечном *Л*, радиальном *Р* и тангенциальном *Т* разрезах



На радиальном разрезе годичные слои имеют вид прямых полос (образующие конусов). На тангенциальном разрезе годичные слои представляют собой извилистые, U-образные полосы (границы сечений конусов продольными плоскостями, не проходящими через их ось). Годичные слои особенно хорошо заметны у хвойных и некоторых лиственных пород.

У деревьев, произрастающих в тропической зоне, собственно годичные слои в древесине могут отсутствовать. Наблюдающаяся же слоистость древесины этих пород может быть вызвана тем, что во время сухих периодов деятельность камбия приостанавливается. Иногда деревья образуют за год два слоя (после того как молодая листва была объедена насекомыми или побита весенними заморозками); так появляются ложные годичные слои с менее резкими границами, часто не охватывающие всю окружность ствола. В отдельные годы может не происходить образования годичных слоев из-за недостаточного питания, декоративной обрезки ветвей и т. д.

Ширина годичных слоев сильно колеблется в зависимости от породы, возраста, условий произрастания, положения в стволе. Наиболее узкие годичные слои (до 1 мм) образуются у медленно растущих пород (самшита), а наиболее широкие (1 см и больше) характерны для быстрорастущих пород (тополя, ивы). Влияние возраста дерева проявляется в изменении ширины годичных слоев по радиусу ствола. При благоприятных условиях роста дерева у сердцевины (т. е. в самом молодом возрасте) находится некоторое количество довольно узких слоев, затем следует зона сравнительно широких слоев, а далее, по мере приближения к коре, ширина годичных слоев постепенно уменьшается. Эта зависимость лучше выражена у светлюбивых хвойных пород (сосна).

На величину прироста древесины влияют метеорологические условия, и их изменения, происходившие в далеком прошлом, можно проследить по ширине годичных слоев. Дерево как бы "записывает" время совершения метеорологических событий: засух и влажных периодов, сильных морозов зимой и ранних заморозков весной, жары летом, циклов солнечной активности и даже космических катастроф. Научная дисциплина,

основанная на анализе годовичных слоев, называется дендрохронология (от греч. "дендрон" – дерево). Для различных регионов и пород составляются стандартные дендрошкалы, отражающие характер изменения ширины годовичных слоев на протяжении многих веков. Они используются в климатологии, археологии, астрофизике и других областях науки.

По высоте ствола (от комля к вершине) ширина годовичных слоев у деревьев, выросших в лесу, увеличивается, что приближает форму ствола к цилиндрической [3].

У одиночно стоящих деревьев самые широкие слои находятся в нижней части ствола, что увеличивает его конусность.

**Ранняя и поздняя древесина годовичных слоев.** У многих пород ясно видно, что годовичный слой состоит из двух частей (см. рис. 4): внутренней, обращенной к сердцевине, более светлой и менее твердой – ранней древесины (она образуется в первой половине вегетационного периода), и наружной, более темной и твердой – поздней древесины. Переход от ранней древесины к поздней может быть очень резким (например, у лиственницы), достаточно четким (у сосны) или почти незаметным (у кедра). Различие в цвете, а также в строении ранней и поздней древесины смежных годовичных слоев обуславливает хорошую видимость их у большинства хвойных и некоторых лиственных пород.

По ранней древесине годовичных слоев в растущем дереве происходит передвижение воды (вверх по стволу), а поздняя древесина выполняет преимущественно механические функции. Соотношение между ранней и поздней древесиной у разных пород различное, оно зависит также от условий произрастания, возраста и изменяется по радиусу и высоте ствола. Диапазон изменения содержания поздней древесины в зависимости от породы весьма большой. Так, у белой акации поздняя древесина занимает примерно 80 % ширины годовичного слоя, а у пихты 20 %.

По радиусу ствола у хвойных пород содержание поздней древесины в направлении от сердцевины к коре сначала увеличивается, а затем ближе к коре уменьшается. По высоте ствола содержание поздней древесины убывает в направлении от комля к вершине и может снизиться в 1,5 – 2 раза.

Поздняя древесина примерно в 2,5 раза плотнее ранней, ее прочность на растяжение вдоль волокон, по данным И.С. Мелехова для ели в 2,7 раза, а по данным В.Е. Вихрова для лиственницы в 3,4 раза превосходит прочность ранней древесины; существенно отличаются жесткость и другие ее свойства. Поэтому количество поздней древесины является важным показателем, характеризующим качество древесины в целом.

**Сердцевинные лучи.** У некоторых лиственных пород на поперечном разрезе ствола хорошо видны светлые, часто блестящие линии, расходящиеся по радиусам от сердцевины к коре и называемые сердцевинными лучами (рис. 5,а).

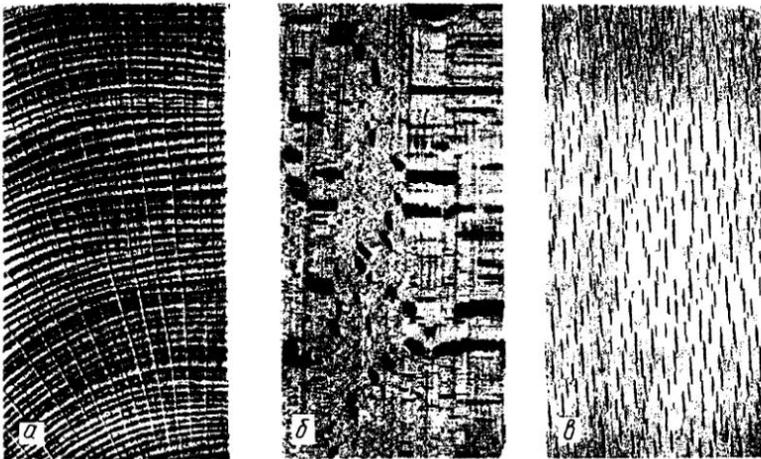


Рис. 5. Сердцевинные лучи у бука на:  
*а* – поперечном, *б* – радиальном, *в* – тангенциальном разрезах

Первичные сердцевинные лучи начинаются у самой сердцевины, а вторичные на разном расстоянии от нее. Лучи доходят до коры и продолжают в ней. В растущем дереве сердцевинные лучи служат для проведения воды и питательных веществ в горизонтальном направлении и для хранения запасных питательных веществ зимой. Сердцевинные лучи имеются у всех пород – как лиственных, так и хвойных. Однако размеры лучей у разных пород различны. Измеряемая на поперечном разрезе ширина лучей в зависимости от породы колеблется в пределах 0,05 – 1 мм.

По ширине различаются три типа лучей: очень узкие, невидимые невооруженным глазом; узкие, трудно различимые невооруженным глазом; широкие, ясно видимые невооруженным глазом. Широкие лучи могут быть настоящими и ложноширокими (агрегатными), т. е. состоящими из пучка близко расположенных друг к другу узких лучей. Среди отечественных пород настоящие широкие лучи имеют дуб, бук и платан, ложноширокие – граб, ольха и лещина. Узкие лучи имеются в древесине клена, вяза, ильма, карагача, липы, кизила и некоторых других пород. Очень узкие лучи, которые можно лишь иногда заметить на строго радиальном разрезе (лучше – расколе), свойственны древесине всех хвойных и многих лиственных пород, (например, ясень, береза, осина, тополь, ива, груша, рябина). У некоторых пород (бук) лучи расширяются при пересечении границ годичных слоев.

На радиальном разрезе древесины сердцевинные лучи обычно заметны в виде поперечных блестящих полосок или пятен, окрашенных темнее или светлее окружающей древесины (рис. 5,б). Ширина полосок зависит от высоты лучей, а длина – от степени совпадения плоскости разреза с

направлением луча. У некоторых пород (платан, клен, ильм и др.) эти полоски на радиальном разрезе образуют красивый рисунок (текстуру).

На тангенциальном разрезе сердцевинные лучи имеют чечевицеобразную форму (рис. 5,в), высота их в зависимости от породы колеблется в широких пределах – от 160 мм (у ольхи) до долей миллиметра (у хвойных пород).

**Серцевинные повторения.** У некоторых лиственных пород (береза, ольха, клен, ива, осина, груша, рябина) на продольных разрезах древесины видны буроватые или коричневатые (иногда желтые), прямые или изогнутые узкие полоски, замкнутые контуры, черточки, пятнышки, по виду напоминающие сердцевину. Эти образования называются *сердцевинными повторениями*. Ранее считали, что они возникают в результате повреждения камбия насекомыми. Н.Е. Косиченко, В.В. Коровин полагают, что эти микроструктурные аномалии могут быть вызваны и другими причинами. По данным А.Л. Синькевича ширина сердцевинных повторений у березы на радиальном разрезе 0,15 – 0,25 мм, на тангенциальном 0,35 – 0,45 мм, длина находится в пределах 5 – 12 мм.

На поперечном разрезе сердцевинные повторения также заметны в виде коротких черточек или пятнышек, расположенных вдоль границ годовичных слоев. Чаще всего сердцевинные повторения встречаются в нижней части стволов указанных лиственных пород. Иногда их можно обнаружить и у хвойных (пихта). В центральной части ствола количество сердцевинных повторений больше, чем в периферической зоне. У березы, ольхи, груши сердцевинные повторения встречаются постоянно, что могут служить диагностическим признаком породы.

Серцевинные повторения ухудшают качество шпона и изготавливаемой из него фанеры; поэтому они под названием *прожилки* рассматриваются среди пороков древесины (см. гл. 7).

**Сосуды.** Эти элементы строения древесины характерны только для лиственных пород. Они часто хорошо заметны на поперечном разрезе в виде отверстий округлой формы. В растущем дереве по сосудам, имеющим форму трубок, поднимается вода с растворенными в ней минеральными веществами из корней в крону. Сосуды подразделяются на *крупные*, легко обнаруживаемые невооруженным глазом, и *мелкие*, не различимые без микроскопа.

Крупные сосуды чаще сосредоточены в ранней зоне годовичных слоев, образуя на поперечном разрезе сплошное кольцо сосудов (например, у дуба), реже крупные сосуды распределены по годовичному слою равномерно (например, у грецкого ореха). Собранные в группы мелкие сосуды (при наличии крупных сосудов в ранней зоне) сосредоточены в поздней зоне, где они заметны невооруженным глазом благодаря более светлой окраске. Если крупных сосудов нет, мелкие сосуды у большинства пород рассеяны по всему слою; однако их количество и величина несколько уменьшаются по направлению к внешней границе слоя.

По расположению сосудов в древесине лиственные породы подразделяют на кольцесосудистые, с кольцом крупных сосудов в ранней зоне годичных слоев и рассеяннососудистые, у которых сосуды независимо от величины распределены по годичному слою более или менее равномерно (рис. 6, г).

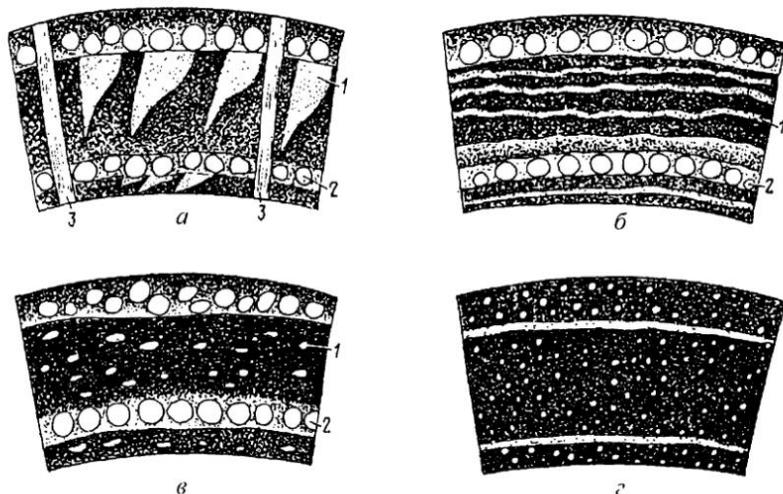


Рис. 6. Схемы расположения сосудов в древесине лиственных пород:  
*а, б, в* – кольцесосудистые породы с радиальным, тангенциальным и рассеянным расположением мелких сосудов в поздней зоне; *г* – рассеяннососудистая порода:  
 1 – мелкие сосуды в поздней зоне; 2 – крупные сосуды в ранней зоне; 3 – широкие сердцевинные лучи

Резкая разница между ранней и поздней зонами обуславливает хорошую видимость годичных слоев у кольцесосудистых пород. В то же время у рассеяннососудистых пород нет различия между этими зонами, годичные слои имеют однородное строение, и границы между ними плохо заметны.

Кольцесосудистыми среди наших лиственных пород являются дуб, ясень, каштан съедобный, вяз, ильм, карагач, бархатное дерево, фисташка и некоторые другие. К рассеяннососудистым относится большинство лиственных пород, среди них с крупными сосудами – грецкий орех и хурма, с мелкими – остальные: береза, осина, ольха, липа, бук, клен, платан, тополь, ива, рябина, груша, лещина и др.

Среди кольцесосудистых можно выделить породы с радиальным расположением (рис. 6, а) групп мелких сосудов, напоминающих язычки пламени (дуб, каштан съедобный), тангенциальным расположением (рис. 6, б) этих групп, образующих вытянутые вдоль годичных слоев сплошные или прерывистые волнистые линии (ильм, вяз, берест), и бес-

порядочным расположением (рис. 6, в) групп мелких сосудов в виде отдельных светлых черточек или точек (ясень).

На продольных разрезах сосуды, особенно крупные, заметны в виде бороздок. Сосуды редко проходят в стволе строго вертикально, поэтому на продольных разрезах бороздки обычно короткие, так как в разрез попадает только часть сосуда. Диаметр крупных сосудов 0,2 – 0,4 мм, мелких 0,016 – 0,1 мм. Длина сосудов обычно не превышает 10 см, но у дуба достигает 3,6 м, а у ясеня иногда доходит до 18 м.

По радиусу ствола в направлении от сердцевины к коре размер сосудов увеличивается, достигает максимума, а затем остается постоянным или несколько уменьшается. По высоте ствола число сосудов и площадь их сечения возрастают по направлению от комля к вершине.

**Смоляные ходы.** Эти элементы строения древесины присущи только хвойным породам. Они представляют собой наполненные смолой каналы, пронизывающие древесину сосны, кедра, лиственницы и ели (у остальных хвойных – пихты, тиса и можжевельника – их нет). Невооруженным глазом можно обнаружить только вертикальные смоляные ходы, а связанные с ними горизонтальные ходы видны лишь под микроскопом. Смоляные ходы заметны на поперечном разрезе в поздней зоне годичных слоев (у сосны и кедра здесь сосредоточено 2/3 общего их количества) в виде белых точек, а на радиальном и тангенциальном разрезах в виде темноватых продольных черточек и линий. Наиболее крупные смоляные ходы у кедра, их диаметр в среднем 0,14 мм, у сосны 0,1 мм, у ели 0,09 мм, у лиственницы 0,08 мм. Длина ходов колеблется в пределах 10 – 80 см, причем в верхней части стволов ели и лиственницы их длина примерно в 2 раза меньше, чем в нижней.

По количеству смоляных ходов на первом месте стоит сосна, далее следует кедр, затем лиственница и ель. У двух последних пород смоляные ходы занимают не более 0,2 % общего объема древесины. Однако и у пород с крупными и многочисленными смоляными ходами они занимают менее 1 % общего объема древесины.

#### § 4. Определение породы по макростроению древесины

Каждая порода отличается строением древесины, тесно связанным с ее свойствами. Оценка физико-механических и технологических свойств древесины с достаточной для практики точностью может быть сделана по справочным данным, если известна порода.

Для установления рода, а иногда и вида древесного растения (идентификации пород), используют признаки, характеризующие макростроение древесины. В число таких признаков входят: наличие ядра; ширина заболони и степень резкости перехода от ядра к заболони; степень видимости годичных слоев и их очертания на поперечном разрезе; четкость границы между ранней и поздней древесиной годичных слоев; наличие, раз-

меры, окраска и количество сердцевинных лучей; размеры, характер группировки и состояние (пустые или заполненные) сосудов в древесине лиственных пород; наличие, размеры и количество вертикальных смоляных ходов в древесине хвойных пород; сердцевинные повторения в древесине некоторых лиственных пород.

Кроме этих основных признаков, при определении пород учитывают некоторые дополнительные признаки. Необходимость использования дополнительных признаков возникает в тех случаях, когда основные признаки выражены нечетко. К дополнительным признакам относятся цвет, блеск, текстура, плотность и твердость.

Древесина некоторых пород обладает характерным цветом, что позволяет легче определить породу. Однако не всегда цвет древесины может служить достаточным основанием для идентификации породы. Дело в том, что нормальная окраска древесины может изменяться под действием внешних физико-химических факторов, а также вследствие поражений грибами. Значительно меньшее диагностическое значение имеет блеск древесины.

При перерезании анатомических элементов на поверхности продольных разрезов образуется тот или иной рисунок. Особенно характерный рисунок – т е к с т у р у образуют сердцевинные лучи. Например, по текстуре поверхности тангенциального разреза бука (см. рис. 5, в) эта порода определяется безошибочно. Иногда в качестве дополнительного признака привлекаются связанные между собой свойства – плотность и твердость древесины. Примерная оценка плотности (массы) и твердости образцов может быть особенно полезна для определения рассеянносудистых лиственных пород, основные признаки которых часто недостаточно ярко выражены.

В качестве пособий для определения отечественных пород можно использовать достаточно полные сводки макроскопических признаков и определители, составленные С.Н. Абраменко (1935), В.Н. Сукачевым (1940), С.И. Ваниным (1940), Л.М. Перелыгиным (1948), В.Е. Вихровым (1959), Б.Н. Уголевым (1965), Б.И. Цыбыком (1963).

## § 5. Микростроение древесины

**Способы исследования микростроения древесины.** Выше были описаны особенности строения древесины, которые можно обнаружить невооруженным глазом или с помощью лупы при увеличении в 5 – 10 раз. Более детально исследовать строение древесины можно с помощью микроскопов на срезах толщиной порядка 10 мкм. Широко применяют световые (фотонные) микроскопы с увеличением в десятки и сотни раз. Предельное полезное увеличение таких микроскопов составляет 2000 раз. При больших увеличениях из-за дифракции, обусловленной волновой природой света, не удастся различить дополнительные подробности структуры объекта. Разрешающая способность микроскопа, определяющая минимальные

размеры обнаруживаемых деталей препарата, равна половине длины волны электромагнитных колебаний. При использовании видимого света разрешающая способность микроскопов составляет  $0,15 - 0,2$  мкм ( $1500 - 2000 \text{ \AA}$ )<sup>1</sup>. Применяя невидимые ультрафиолетовые лучи, имеющие меньшую длину волны, разрешающую способность можно несколько увеличить; в этом случае изображение приходится фиксировать на фотопленке.

Используя поляризационные микроскопы, отличают анизотропные тела от изотропных. При расположении поляризационных призм под углом  $90^\circ$  все поле зрения темное и светятся только анизотропные элементы, двояко преломляющие лучи.

Окрашивая срезы, получают цветные микрохимические реакции, позволяющие судить о составе и распределении веществ, слагающих исследуемый объект. Для этой же цели используют люминесцентные микроскопы, которые дают цветные изображения из-за способности входящих в древесину веществ (в натуральном виде или после окрашивания флюорохромами) по-разному светиться в ультрафиолетовых лучах.

Все шире разворачиваются исследования строения древесины с помощью электронных микроскопов. В этих приборах вместо видимого света используют электронные лучи, имеющие гораздо меньшую длину волны. Применяются просвечивающие (ПЭМ) и растровые (РЭМ) электронные микроскопы. Разрешающая способность ПЭМ у современных моделей достигает  $0,1 - 0,2$  нм ( $1 - 2 \text{ \AA}$ ).

Растровые, или сканирующие (от английского "скан" – просматривать), электронные микроскопы имеют меньшую разрешающую способность ( $2 - 3$  нм), но они дают трехмерное изображение, выявляющее глубину структурных элементов.

Для исследований с помощью ПЭМ применяют ультратонкие (толщиной  $25 - 70$  нм) срезы или реплики – слепки с объектов. Для увеличения контрастности изображения ультратонкие срезы обрабатываются веществами, образующими электронноплотные соединения. При использовании реплик контрастность достигается напылением в вакууме слоя углерода и последующим нанесением под углом (оттением) труднопроницаемого тяжелого металла (хрома, платины, золота и др.), который слоем неравномерной толщины откладывается на рельефной поверхности реплики.

При использовании РЭМ на сухие объекты наносят мелкозернистый слой тяжелого металла. В последнее время для предотвращения искажений структуры при сушке объекты замораживают в жидком азоте.

Описание строения древесины, приводимое ниже, основано на данных, полученных всеми видами микроскопии, а также на результатах ис-

---

<sup>1</sup>  $1 \text{ \AA}$  (ангстрем) =  $0,1$  нм (нанометра) =  $10^{-4}$  мкм (микрометра) =  $10^{-10}$  м.

следования тонкой структуры древесины химическими и физическими методами.

Новые возможности открывает использование микроскопов, снабженных вычислительными устройствами для количественной оценки структуры объекта (имидж-анализ).

При последующем изложении вопросов, связанных с анатомией древесины, использована в основном терминология, рекомендуемая Международной ассоциацией анатомов древесины (ИАВА) и введенная в отечественную ботаническую литературу А.А. Яценко-Хмелевским [80].

**Растительные клетки.** Все растения состоят из клеток, в которых живое содержимое – протопласт заключено в оболочки. По форме растительные клетки делят на две основные группы – паренхимные и прозенхимные.

**Паренхимные** (от латинского "пар" – равный и греческого "энхима" – налитое) клетки имеют округлую или многогранную форму с примерно одинаковыми размерами по трем направлениям (0,01 – 0,1 мм), оболочки клеток обычно тонкие. **Прозенхимные** (от греческого "прос" – по направлению к...) клетки имеют сильно вытянутую, напоминающую волокно, форму (диаметр таких клеток 0,01 – 0,05 мм, длина 0,5 – 3,0, иногда до 8 мм) и часто утолщенные оболочки.

Древесина растущего дерева, в основном (на 90 – 95 %), состоит из мертвых клеток и лишь часть клеток (паренхимные) сохраняет живой протопласт. Длина большинства клеток ориентирована в направлении продольной оси дерева.

Совокупность клеток одинакового строения, выполняющих одни и те же функции, образует ткани. В растущем дереве представлены следующие типы тканей: **покровные**, расположенные на самой поверхности растения; **механические**, придающие прочность телу растения; **проводящие**, служащие для проведения воды с растворенными в ней питательными веществами; **запасные**, являющиеся хранилищами запасных питательных веществ (сахаров, крахмала и др.); **образовательные**, функция которых – образование новых клеток путем многократного деления; **ассимиляционные**, усваивающие углекислоту в процессе фотосинтеза. Ассимиляционная ткань наибольшего развития достигает в листьях. Древесина включает проводящую, механическую и запасную ткани, в коре к ним присоединяется покровная ткань; между древесиной и корой находится тонкая прослойка образовательной ткани (камбия).

**Камбий** состоит из двух типов живых начальных клеток – веретеновидных и лучевых инициалей. От первого типа инициалей, имеющих сильно вытянутую в одном направлении форму, в древесине и коре образуются анатомические элементы, ориентированные вдоль оси дерева. От второго типа инициалей, имеющих примерно одинаковые размеры по всем

направлениям, образуются элементы, расположенные в растущем дереве горизонтально. Преобладают веретенovidные инициали.

В период активности камбия инициали вытягиваются в направлении радиуса ствола и делятся тангенциальными перегородками. При этом одна из вновь образовавшихся клеток остается камбиальной, а другая, после еще одного-двух делений, становится клеткой древесины или луба коры. В сторону древесины клетки откладываются в 4 – 6 раз чаще, чем в сторону коры; поэтому древесины в стволе значительно больше, чем луба.

В связи с приростом древесины по радиусу ствола увеличивается и длина окружности, которую должен охватывать слой камбия. Это достигается главным образом за счет увеличения количества камбиальных клеток, вследствие их деления продольными радиальными или косорадиальными перегородками. Образующиеся в последнем случае короткие клетки вклиниваются своими концами между уже имеющимися камбиальными клетками ("скользящий рост"). Кроме того, происходит некоторое увеличение размеров клеток в тангенциальном направлении.

В сформировавшейся древесине имеются пустые или заполненные различными веществами пространства между округленными углами клеток – межклетники.

**Образование и строение клеточных стенок древесины.** Во время вегетации в клетке камбия появляется клеточная пластинка, которая, разрастаясь, разделяет материнскую клетку на две дочерние. Эта пластинка состоит из пектиновых соединений – аморфных, гидрофильных и очень пластичных. Затем по обе стороны от клеточной пластинки откладываются первичные оболочки, отграничивающие протопласт каждой дочерней клетки.

Первичные оболочки состоят из отдельных микрофибрилл целлюлозы, между которыми размещаются аморфные вещества матрикса. Целлюлоза (от латинского "целлюла" – клетка) представляет собой углеводный полимер с очень длинной цепной молекулой. Микрофибриллы (от латинского "фибра" – волокно) образуют беспорядочную сетку.

Матрикс в начале формирования клетки состоит из пектиновых соединений и гемицеллюлоз – веществ, близких к целлюлозе, но отличающихся меньшей длиной молекул. В матриксе содержится также значительное количество воды. По мере увеличения поперечных размеров, а затем и длины клеток, происходит поверхностный рост первичных оболочек, легко осуществляемый благодаря пластичности матрикса. В длину клетки увеличиваются больше, чем в поперечных направлениях, что, как полагают, объясняется сдерживающим влиянием целлюлозных микрофибрилл.

После окончания роста клетки растяжением начинается образование вторичной оболочки, состоящей вначале из целлюлозы и гемицеллюлоз. Со стороны полости клетки на первичную оболочку слоями откладываются

ся целлюлозные микрофибриллы, которые во вполне сформированной зрелой клетке выполняют главным образом механические функции. Упрочнение клеточных оболочек происходит также вследствие их одревеснения, благодаря образованию лигнина. Сложный неуглеводный полимер – лигнин (от латинского "лигнум" – дерево) придает клеточным оболочкам жесткость, способность сопротивляться сжимающим нагрузкам. Лигнификация происходит на этапе образования вторичной оболочки. Вначале одревеснеет первичная оболочка (прежде всего в углах клетки), затем межклеточный слой и в дальнейшем – вторичная оболочка.

Первичная оболочка, содержащая сравнительно мало целлюлозы, для обеспечения необходимой прочности одревеснеет значительно больше, чем вторичная. У вполне сформированной клетки матрикс состоит в основном из лигнина.

Обогащенное лигнином межклеточное вещество и первичные оболочки двух соседних клеток образуют сложную срединную пластинку.

Изучая срубленную древесину как материал, необходимо иметь в виду, что она состоит из клеток с отмершим протопластом, т. е. только из одних клеточных оболочек. Оболочка взрослой клетки в технической анатомии древесины называется "клеточная стенка", ее строению и свойствам посвящены сотни исследований, рассмотренных в известной монографии [31], и последующие работы.

Основное вещество, слагающее клеточную стенку и определяющее слоистость ее строения, – целлюлоза. Мельчайшим, но уже различным с помощью электронного микроскопа структурным образованием является элементарная фибрилла, представляющая собой пучок макромолекул целлюлозы. Поперечные размеры элементарных фибрилл колеблются в довольно широких пределах. Можно считать, что условный диаметр элементарной фибриллы в среднем равен 3,5 нм, хотя по некоторым данным наибольший поперечный размер элементарной фибриллы может достигать до 10 нм. В состав элементарной фибриллы входит примерно 30 – 40 молекул целлюлозы. Элементарные фибриллы включают участки с упорядоченным (кристаллические области) и беспорядочным (аморфные области) расположением молекул целлюлозы. При этом одна и та же молекула проходит через кристаллические и аморфные области. Протяженность кристаллических областей (кристаллитов) составляет  $100 \pm 20$  нм, а длина аморфных зон 30 – 40 нм.

Основным структурным элементом, хорошо видимым в электронный микроскоп, является уже упоминавшаяся микрофибрилла. Это лентоподобное образование, имеющее размеры по толщине 5 – 10 нм, ширине 10 – 30 нм и длине – несколько микрометров, включает в себя элементарные фибриллы.

Иногда выделяют более крупные структурные образования, видимые в обычный световой микроскоп. Это макрофибриллы, или просто фибриллы, имеющие поперечные размеры порядка 400 нм и более.

Слоистое строение клеточной стенки можно наблюдать с помощью светового микроскопа. На микрофотографии (рис. 7), например, показан поперечный срез древесины сосны.



Рис. 7. Клеточные стенки на поперечном срезе древесины сосны. Ув. 1250 × (по В.Е. Москалевой)

В поляризованном свете обнаруживается неоднородность клеточной стенки. Более детальное представление о строении клеточной стенки дает электронная микроскопия.

На рис. 8 показана схема строения клеточной стенки, предложенная В. Лизе и несколько дополненная нами.

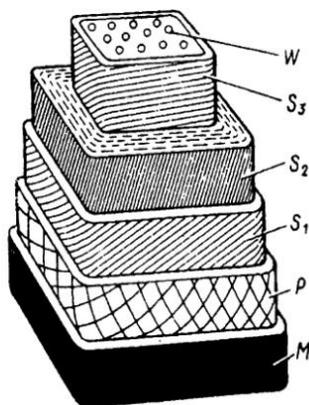


Рис. 8. Схема строения клеточной стенки трахеиды хвойных пород

На каждой "ступеньке" этой пространственной модели часть клеточной стенки, предшествующая данному слою, удалена. Тонкими линиями показано расположение микрофибрилл.

В нижней части модели изображена тонкая срединная пластинка *M*. Толщина ее колеблется в пределах 0,5 – 1,5 мкм. Срединная пластинка состоит преимущественно (на 60–90 %) из лигнина. Кроме того, здесь содержатся

гемицеллюлозы и пектины, а также небольшие количества кремния и других минеральных веществ. Срединная пластинка отличается довольно большой пористостью: капилляры занимают примерно 20 % ее площади [31].

Первичная оболочка *P* также тонкая. В природном сыром состоянии толщина ее 0,1 – 0,5 мкм, в сухом состоянии она примерно в 3 раза меньше. На рис. 9,а показано беспорядочное расположение микрофибрилл в первичной оболочке после ее делигнификации. Между целлюлозными микрофибриллами находится лигнин. В "сложной срединной пластинке" его содержится примерно 70 %, целлюлозы – около 10 %, а остальное – гемицеллюлозы и пектин.

Вторичная оболочка  $S$  по крайней мере в 10 раз толще первичной. Она характеризуется спиральным расположением микрофибрилл под разными углами к продольной оси клетки. В тонком внешнем слое  $S_1$  (его толщина примерно такая же, как у оболочки  $P$ ) можно наблюдать несколько слоев – ламеллы с перекрещивающимися спиралями микрофибрилл под углом к оси клетки примерно  $60^\circ$  у хвойных (рис. 9, б) и около  $45^\circ$  – у лиственных пород. Кроме того, у некоторых хвойных пород (например, лиственницы) встречаются микрофибриллы, направленные почти перпендикулярно к оси клетки.

В мощном среднем слое  $S_2$ , включающем в себя десятки ламелл, микрофибриллы расположены в виде правонаправленных ( $Z$ -образных) спиралей с очень небольшим углом наклона в  $5 - 15^\circ$  (редко до  $30^\circ$ ). На рис. 9, в показан слой  $S_2$  с микрофибриллами, вытянутыми почти вдоль оси клетки.

Во внутреннем слое  $S_3$ , толщиной всего лишь  $0,1 - 0,2$  мкм, микрофибриллы расположены по пологим спиралям с углом наклона  $50 - 90^\circ$ . На рис. 9, г показан слой, на поверхности которого видны отдельные бородавки. Эти бородавки встречаются у ряда пород и образуют так называемый бородавчатый слой  $W$ , состоящий из лигнина, гемицеллюлоз и простых белков – протеинов.

Матрикс вторичной оболочки, окружающий целлюлозные микрофибриллы, включает в себя те же вещества, что и в первичной оболочке. Однако по сравнению с оболочкой  $P$  содержание лигнина в оболочке  $S$  уменьшается, а целлюлозы и гемицеллюлоз увеличивается. В матриксе имеются пустоты, которые могут заполняться водой. Она может находиться и в самих микрофибриллах. По измерениям П.Н. Одинцова и П.П. Эриньша объем капилляров в насыщенных клеточных стенках древесины ели составляет  $0,3 \text{ см}^3/\text{г}$ , диаметр большинства капилляров  $5 - 6$  нм.

Имеющиеся в литературе сведения о размерах капилляров весьма разноречивы, так как они зависят от применяемых методов исследования, породы и состояния древесины. Так, по некоторым данным диаметр капилляров может доходить до  $30 - 40$  нм.

В абсолютно сухих клеточных стенках капилляры практически отсутствуют. Внутренняя поверхность абсолютно сухой древесины, составляющая примерно  $1 \text{ м}^2$  на  $1 \text{ г}$  ее массы, немногим больше внешней поверхности клеточных стенок [31].

Вторичная оболочка имеет углубления – поры. Обычно рассматривают пару пор, находящихся друг против друга в соседних клетках. Между полостями пор находится мембрана, образованная межклеточным веществом и первичными оболочками. Если вторичная оболочка нависает над полостью поры в виде свода, то пора называется окаймленной. При отсутствии такого свода пора называется простой. Вид окаймленных пор (мембраны удалены) на радиальных стенках трахеид показан на рис. 10. Иногда встречаются полукрайменные поры, имеющие свод только в оболочке одной из двух соседних клеток.



Рис. 9. Расположение микрофибрилл в различных слоях клеточной стенки трахеид на электронографиях реплик, ПЭМ (а, б, в – по З.Е. Брянцевой, з – по В. Лизе):

а) Первичная оболочка  $P$ . Лиственница. Ув. 5700 $\times$ ; б) Внешний слой  $S_1$  вторичной оболочки. Лиственница. Ув. 7500 $\times$ ; в) Средний слой  $S_2$  вторичной оболочки. Лиственница. Ув. 9000 $\times$ ; з) Внутренний слой  $S_3$  вторичной оболочки, видны бороздки. Сосна. Ув. 10000 $\times$ ;

Рис. 10. Взаимное расположение трахеид с окаймленными порами на радиальных стенках. Сосна. РЭМ. Ув. 850× [По 82]

В центре мембраны в окаймленных порах у древесины хвойных пород имеется утолщение самой разнообразной формы – торус (рис. 11). Часть мембраны, окружающая торус, называется краевой зоной. Она хорошо проницаема, размер отверстий доходит до 200 нм. В лигнифицированном торусе отверстия обычно отсутствуют. Входное отверстие поры может иметь не только округлую, но и щелевидную форму.

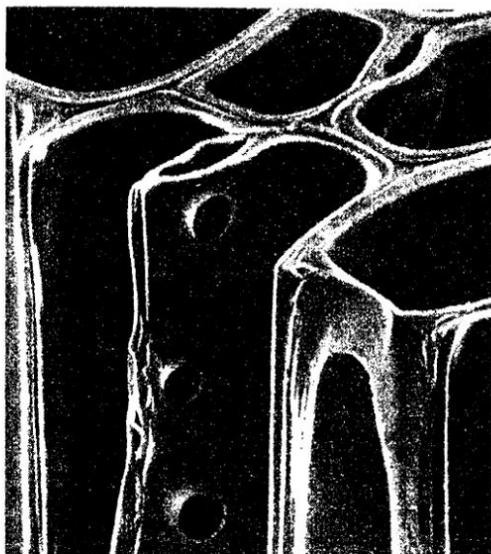


Рис. 11. Радиальный разрез окаймленной поры. Часть мембраны и торуса удалена. РЭМ. Ув. 3200× По [82]

### Строение древесины хвойных пород.

Образованная камбием так называемая вторичная древесина у хвойных пород состоит из ограниченного набора анатомических элементов. Они организованы в довольно упорядоченную структуру, которую целесо-



образно изучать, выделяя элементы, выполняющие в стволе живого дерева преимущественно одну из трех физиологических функций.

Объемная схема (рис. 12) показывает, что древесина сосны – типичной хвойной породы, состоит из двух взаимопроникающих систем клеток, расположенных вдоль и поперек оси ствола. Проводящую и механическую функции выполняют прозенхимные клетки с отмершим протопластом – трахеиды, которые в растущем дереве расположены главным образом вертикально. Они составляют основную долю (90 % и выше) объема древесины. Запасную функцию выполняют живые паренхимные клетки.

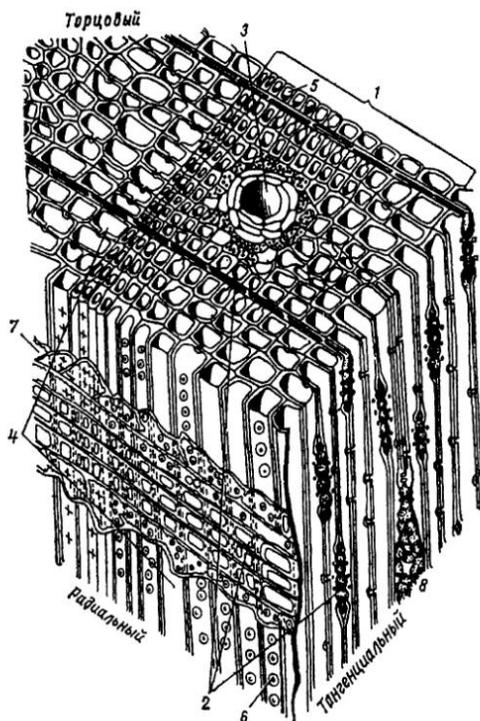


Рис. 12. Схема микроскопического строения древесины сосны (по В.Е. Вихрову):

1 – годичный слой; 2 – сердцевинные лучи; 3 – вертикальный смоляной ход; 4 – ранние трахеиды; 5 – поздняя трахеида; 6 – окаймленная пора; 7 – лучевая трахеида; 8 – многоклеточный луч с горизонтальным смоляным ходом

**Трахеиды.** У всех хвойных пород трахеиды (от греческого "трахея" – дыхательное горло и "эйдос" – вид) имеют форму сильно вытянутых волокон с одревесневшими стенками и кососрезанными концами. На поперечном разрезе по форме они у большинства пород близки к прямоугольникам (иногда квадратам), а у лиственницы к пяти- или шестиугольникам.

Трахеиды собраны в радиальные ряды. В каждом таком ряду крупнополостные трахеиды с относительно тонкими стенками сменяются трахеидами, отличающимися малыми полостями и толстыми стенками. Первые из указанных клеток образуются в начале вегетационного периода и называются ранними трахеидами; они выполняют в основном проводящую функцию. Вторые появляются в последующей стадии вегетационного периода и называются поздними трахеидами; это преимущественно механические элементы. Современные представления о причинах образования ранних и поздних трахеид на примере сосны и лиственницы рассмотрены

Г.Ф. Антоновой [2]. Размер трахеид в тангенциальном направлении у каждой породы практически постоянен. Однако радиальный размер трахеид в ранней зоне годичного слоя больше, чем в поздней зоне примерно в 2 – 2,5 раза, а иногда и более (табл. 3).

### 3. Размеры трахеид некоторых хвойных пород

Порода	Поперечные размеры трахеид, мкм			Длина трахеид, мм	Источник
	радиальный	тангенциальный	толщина стенки		
Лиственница	52,4 / 21,8	32,0 / 27,4	3,3 / 6,6	2,5 / 2,7	В.Е. Вихров [по 48]
Сосна	40,0 / 20,0	– / –	2,0 / 5,5	2,8	Л.М. Перелыгин [48]
Сосна	40,9 / 19,7	29,4 / 32,5	1,5 / 5,9	– / –	В.Е. Москалева [43]
Ель	35 / 13	– / –	2,2 / 3,9	– / –	А.Н. Гартман [по 31]
Ель	45 / 22	– / –	3,0 / 5,0	– / –	Т.А. Мелехова [по 48]

\* В числителе размеры трахеид ранней зоны годичного слоя, в знаменателе – поздней.

Здесь приведены средние значения сильно изменчивых размеров трахеид.

Отношение радиального размера клеток к толщине стенок у ранних трахеид составляет 15 – 20, а у поздних всего лишь 3 – 5. Длина трахеид у отечественных хвойных пород равна обычно 2,5 – 4,5 мм, однако у секвойи она достигает 7,4 мм [88]. Средние поперечные размеры трахеид примерно в 100 раз меньше их длины. Разницы в длине ранних и поздних трахеид почти не наблюдается. Различия в строении ранних и поздних трахеид показаны на рис. 13, а, б.

В ранних трахеидах на радиальных стенках, особенно у концов (несколько закругленных), находится множество (70 – 90) крупных окаймленных пор с округлыми отверстиями. В поздних трахеидах поры располагаются не только на радиальных, но иногда и на тангенциальных стенках. Однако у этих трахеид поры мелкие, обычно имеют щелевидные отверстия и количество их у сосны и ели в 3 – 4 раза, а у лиственницы почти в 11 раз меньше, чем у ранних трахеид. Диаметр окаймленных пор у разных пород колеблется от 8 до 31 мкм, а диаметр отверстия от 4 до 8 мкм [49]. Между окаймленными порами у ранних трахеид сосны встречаются поперечные образования (крассулы).

В окаймленных порах мембрана иногда отклонена от центрального положениями, и торус закрывает отверстие окаймленной поры. Количество таких закрытых пор, проникновение жидкостей через которые затруднено, в ранних трахеидах ядра (спелой древесины) растущих деревьев значительно больше, чем в поздних трахеидах. По исследованиям В.А. Баженова (1952) и других [43, 71] в сухой древесине существенных различий в положении торуса в трахеидах ядра и заболони не наблюдается.

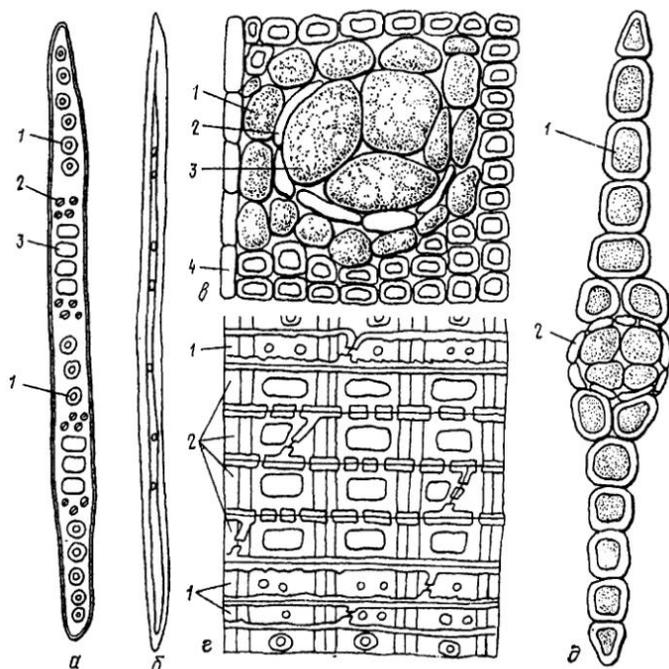


Рис. 13. Анатомические элементы древесины хвойных пород (сосна):

*а* – ранняя трахеида (радиальный разрез): 1 – крупная окаймленная пора; 2 – мелкая окаймленная пора; 3 – простая (оконцевая) пора в месте контакта с сердцевинными лучами; *б* – поздняя трахеида (радиальный разрез); *в* – смоляной ход (поперечный разрез): 1 – клетка сопровождающей паренхимы; 2 – мертвая пустая клетка; 3 – выстилающая клетка (эпителий); 4 – сердцевинный луч; *г* – сердцевинный луч (радиальный разрез): 1 – лучевая трахеида; 2 – паренхимные клетки; *д* – сердцевинный луч с горизонтальным смоляным ходом (тангенциальный разрез): 1 – сердцевинный луч; 2 – горизонтальный смоляной ход

**Паренхимные клетки.** Эти клетки в древесине хвойных пород входят главным образом в состав сердцевинных лучей (лучевая древесинная паренхима), а также сопровождают смоляные ходы и представлены осевой древесинной паренхимой.

**Серцевинные лучи** у хвойных пород занимают 5–10% общего объема древесины, причем верхний предел этого диапазона относится к древесине лиственницы, сбрасывающей зимой хвою. На поперечном разрезе сердцевинные лучи состоят из одного ряда паренхимных клеток. На радиальном разрезе сердцевинные лучи по высоте состоят из нескольких рядов паренхимных клеток с простыми порами.

У лиственницы, сосны, кедра и ели сердцевинные лучи неоднородны: по верхнему и нижнему краям их располагаются горизонтальные (лучевые) трахеиды с мелкими окаймленными порами (рис. 13, *г*). Лучевые

трахеиды некоторых пород отличаются характерными утолщениями стенок. Горизонтальные, также как и вертикальные, трахеиды в растущем дереве являются мертвыми элементами. У пихты, можжевельника и тиса лучи однородные, состоящие только из паренхимных клеток.

Паренхимные клетки сердцевинных лучей сосны имеют по одной, а кедра – по две крупные простые (оконцевые) поры. Соответствующее количество пор по ширине трахейд обнаруживается в поле перекреста их с сердцевинными лучами (рис. 13, а). У остальных наших хвойных пород в поле перекреста находится по 3 – 6 мелких простых пор. У сосны, кедра, лиственницы и ели часто встречаются сердцевинные лучи, которые на тангенциальном разрезе в средней части имеют не одну, а несколько паренхимных клеток по ширине. В таких сердцевинных лучах проходят горизонтальные смоляные ходы (рис. 13, д).

Серцевинные лучи в растущем дереве не только хранят запасные питательные вещества в период покоя, но и проводят растворы веществ в горизонтальном направлении в период вегетации. Н.Н. Киселев и А.Д. Тарабрин (МЛТИ), используя метод меченых атомов, показали, что по сердцевинным лучам проходит вода с растворенным фосфорнокислым натрием. Однако позднее в опытах Г.Б. Кедрова (МГУ) с пихтой, можжевельником и туей было установлено, что горизонтальный ток жидкостей осуществляется по радиальной системе проводящих путей через окаймленные поры вертикальных трахейд.

Смоляные ходы, как уже отмечалось, из наших хвойных пород имеют сосна, кедр, лиственница и ель. Они образуют единую смолоносную систему, состоящую из пересекающихся вертикальных и горизонтальных ходов. Эти межклеточные ходы включают три или два слоя клеток. У вертикальных ходов внутренний слой представляет собой клетки эпителия, выделяющие смолу. За этими клетками, выстилающими полость хода, следует слой пустых мертвых клеток, а снаружи находится слой живых клеток сопровождающей паренхимы (рис. 13, в). Горизонтальные ходы проходят в сердцевинных лучах и поэтому состоят только из клеток эпителия и слоя мертвых клеток. Клетки эпителия имеют тонкие оболочки и выглядят как пузыри, вдающиеся в канал хода. Когда ход заполнен смолой, выстилающие клетки вследствие большого давления сплюсциваются и прижимаются к стенкам канала.

Размер полости вертикального хода в тангенциальном направлении соответствует примерно четырем трахеидам. В поперечном сечении хода находится от 4 до 12 клеток эпителия. В сосне и кедре – более крупные клетки эпителия. У горизонтальных ходов, диаметр которых в 2,5 – 3 раза меньше, чем вертикальных, и более мелкие клетки эпителия. Длина клеток эпителия несколько превышает их поперечные размеры. Мертвые клетки – узкие и длинные, а клетки сопровождающей паренхимы в несколько раз длиннее мертвых и значительно шире их.

Иногда встречаются ходы травматического происхождения; они могут появиться даже у пород, в древесине которых обычно нет смоляных ходов (например, у пихты). Травматические смоляные ходы крупнее, но короче нормальных.

Осевая древесинная паренхима наблюдается в очень небольшом количестве у всех хвойных пород (кроме сосны и тиса) в виде одиночных клеток или вытянутых вдоль оси ствола тяжёлых паренхимных клеток. На продольных разрезах клетки древесной паренхимы имеют прямоугольную форму, длина их в 3–4 раза больше ширины.

**Строение древесины лиственных пород.** Древесина лиственных пород в отличие от хвойных пород состоит из большего набора основных анатомических элементов и их переходных форм, расположенных менее упорядоченно.

На рис. 14 показана объёмная схема древесины типичной кольцесосудистой породы (дуб), а на рис. 16 – рассеянососудистой (береза). Проводящую функцию у лиственных пород выполняют сосуды и трахеиды (сосудистые, а также волокнистые), механическую – волокна либриформа и волокнистые трахеиды, запасующую – паренхимные клетки.

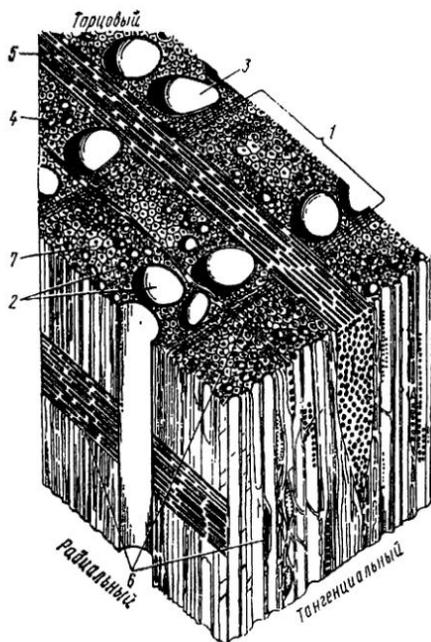


Рис. 14. Схема микроскопического строения древесины дуба (по В.Е. Вихрову):

1 – годичный слой; 2 – сосуды; 3 – крупный сосуд ранней зоны; 4 – мелкий сосуд поздней зоны; 5 – широкий сердцевинный луч; 6 – узкие сердцевинные лучи; 7 – либриформ

**Сосуды.** Эти специализированные водопроводящие анатомические элементы занимают довольно большую часть объема ствола, у разных пород она колеблется в пределах 10–55%. Сосуды (рис. 15) представляют собой длинные вертикальные трубки, состоящие из членков – отдельных коротких клеток с широкими полостями и тонкими стенками.

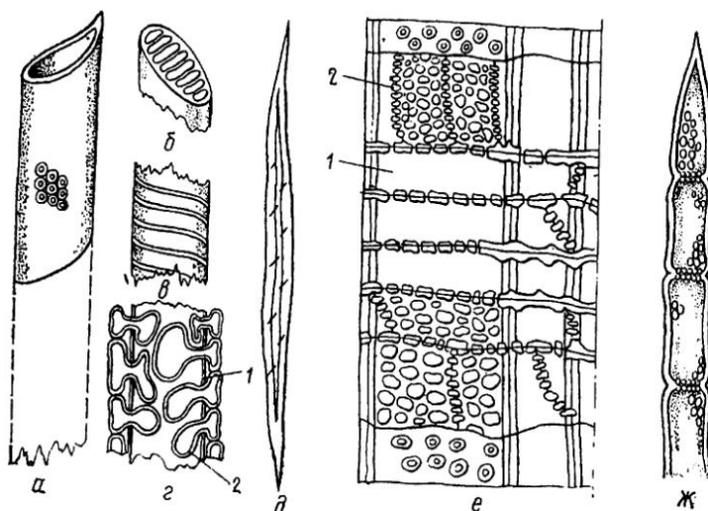


Рис. 15. Основные анатомические элементы (и их детали) древесины лиственных пород:

*а* – сосуд из члеников с простой перфорацией, коротким клювиком и очередной поперостью; *б* – лестничная перфорация; *в* – спиральное утолщение; *з* – тиллы в сосудах; *1* – стенки сосуда; *2* – тиллы; *д* – волокно либриформа; *е* – неоднородный сердцевинный луч (ива) с лежащими *1* и стоячими *2* паренхимными клетками; *ж* – часть тяжа древесной паренхимы

О размерах члеников в ранних и поздних зонах дают представление данные [48], приведенные в табл. 4.

#### 4. Размеры члеников сосудов в ранней и поздней зонах годичного слоя древесины некоторых кольцесосудистых пород

Порода	Диаметр сосуда, мкм		Длина члеников, мм	
	Зоны годичного слоя			
	ранняя	поздняя	ранняя	поздняя
Дуб летний	200 – 400	30 – 40	0,39	0,56
Ясень обыкновенный	200 – 250	30	0,23	0,27
Вяз	200 – 250	30	–	–
Ильм	–	–	0,24	0,34
Каштан съедобный	300 – 350	16 – 30	0,36	0,58

Нижние и верхние или кососрезанные боковые стенки этих клеток частично или полностью разрушаются. При этом образуются простые (одно или два округлых отверстия) или лестничные (ряд щелевидных отверстий) перфорации.

В крупных сосудах, состоящих из коротких цилиндрических или бочкообразных члеников, перфорации простые, расположены на попереч-

ных стенках. У мелких сосудов с длинными члениками перфорации обычно размещаются на боковых стенках и бывают лестничными.

Для большинства пород характерно наличие простых перфораций, у некоторых пород (береза, ольха, самшит) – только лестничных. Сосуды бука и платана имеют перфорации обоих типов. Часто членики сосудов оканчиваются более или менее длинными замкнутыми придатками – клювиками (рис. 15, а). Стенки сосудов у некоторых пород (липа, клен) имеют спиральные утолщения (рис. 15, в). У большинства пород таких утолщений или вовсе нет, или наблюдается слабая спиральная штриховатость [19].

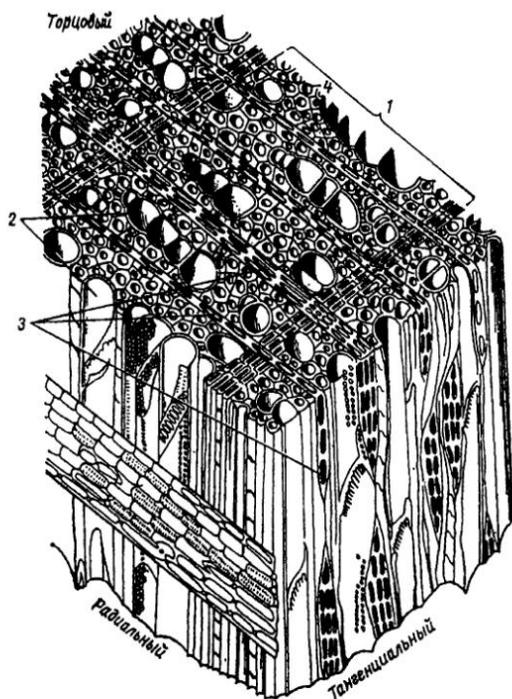


Рис. 16. Схема микроскопического строения древесины березы (по В.Е. Вихрову):

1 – годичный слой; 2 – сосуды; 3 – сердцевинные лучи; 4 – либриформ

Окаймленные поры, которые также имеются на стенках сосудов, располагаются в определенном порядке. Чаще всего они образуют (рис. 15, а) диагональные ряды (очередная поровость), реже – короткие горизонтальные ряды (супротивная поровость). Окаймленные поры у сосудов отличаются от пор у трахеид хвойных пород меньшими размерами и отсутствием торуса.

Между собой сосуды сообщаются через окаймленные поры, а с примыкающими паренхимными клетками – через полуокаймленные поры (окаймление только со стороны сосуда).

Сосуды в стволе отклоняются от вертикали в тангенциальном и отчасти в радиальном направлениях. Благодаря концевым и промежуточным контактам сосудов создается единая пространственно разветвленная водопроводящая система. Из этой системы выключаются сосуды, в которые че-

рез окаймленные поры вдаются выросты горизонтально расположенных паренхимных клеток – тиллы (рис. 15, з). Эти мешковидные образования с одревесневшими оболочками обычно закупоривают сосуды в процессе формирования ядра. У наших пород тиллы встречаются в ядре акации, грецкого ореха, дуба, ясеня. Тиллы могут появиться и в заболони при резком снижении влажности в сосудах вследствие различия давлений в паренхимных клетках и сосудах, деятельности грибов и вирусной инфекции.

**Сосудистые трахеиды.** Эти элементы являются переходной формой между типичными трахеидами и сосудами. По своей форме, размерам, расположению пор и наличию у некоторых пород спиральных утолщений они напоминают членики мелких сосудов. Сосудистых трахеид в стволе сравнительно мало, и при определении объема, занимаемого водопроводящими элементами, их учитывают вместе с сосудами.

**Волокна либриформа.** Основная механическая ткань – либриформ у многих лиственных пород занимает наибольшую часть объема древесины ствола, ее содержание у разных пород колеблется в пределах 35 – 75 %. Волокна либриформа (от латинского "либри" – лыко и "форма" – вид) представляют собой типичные прозенхимные, то есть вытянутые клетки с заостренными концами, узкими полостями и мощными стенками, снабженными простыми щелевидными порами (рис. 15, д). Поры расположены под углом к длинной оси, количество их невелико. Окончания волокон могут быть гладкими, зазубренными или разветвленными. Волокна либриформа имеют значительно меньшие размеры, чем механические элементы хвойных пород – поздние трахеиды. Об этом свидетельствуют данные [48], приведенные в табл. 5.

5. Размеры волокон либриформа некоторых пород

Породы	Диаметр, мкм	Толщина стенок, мкм	Длина, мм
Дуб	15	5,0	1,00
Ясень	12	2,4	0,96
Гикори	12	4,0	1,30
Акация белая	11	3,4	0,87
Береза	19	3,0	0,31
Тополь	17	2,0	0,90

На поперечном разрезе у большинства пород по внешней границе годичного слоя располагается узкая полоска из двух-трех рядов радиально сжатых толстостенных волокон либриформа. Благодаря этой полоске годичные слои хорошо различаются.

**Волокнистые трахеиды.** Эти элементы, так же как волокна либриформа, имеют толстые стенки и малые полости; однако поры у волокнистых трахеид окаймленные.

Иногда у лиственных пород встречаются так называемые "желатинизированные волокна". В этих волокнах желатинизированный слой с очень

малым содержанием лигнина добавляется к внутреннему слою  $S_3$  клеточной стенки или может полностью заменять его (а иногда и два слоя –  $S_2$  и  $S_3$ ).

**П а р е н х и м н ы е к л е т к и.** У отечественных лиственных пород, сбрасывающих на зиму листву, объем хранилищ запасных веществ (паренхимных клеток) больше, чем у хвойных. Паренхимные клетки занимают 8 – 40 % объема древесины ствола. Они образуют единую систему из горизонтально ориентированных клеток (сердцевинные лучи) и вертикально ориентированных клеток (осевая древесинная паренхима).

**С е р д ц е в и н н ы е л у ч и** объединяют основную часть паренхимных клеток. Объем сердцевинных лучей у некоторых пород, например у дуба, может составлять 28–32 % общего объема древесины ствола.

По ширине сердцевинные лучи могут быть одно- и многорядными. Лучи первого типа содержат осина, ива, тополь, каштан и др. Лучи второго типа характерны для обширной группы пород. Несколько пород имеют по 12 и более рядов паренхимных клеток: например, бук и платан (12–16 рядов), дуб (30 рядов).

У некоторых лиственных пород (граб, ольха, лещина), как уже отмечалось, имеются ложноширокие (агрегатные) сердцевинные лучи, состоящие из близко расположенных друг к другу узких лучей. Породы с широкими и агрегатными сердцевинными лучами содержат также и узкие лучи.

По высоте сердцевинные лучи также отличаются большим разнообразием. Они могут содержать от нескольких (например, у ивы) до более сотни рядов клеток по высоте (например, у бука). У одной и той же породы могут быть и низкие, и высокие сердцевинные лучи.

Сечение сердцевинных лучей, которое можно наблюдать на тангенциальном разрезе древесины, имеет вид четок – вертикальной цепочки клеток, если лучи однорядные по ширине, и вид веретена – у многорядных по ширине лучей.

На радиальных срезах древесины у многих пород паренхимные клетки сердцевинных лучей – "лежачие". У отдельных пород клетки нижнего и верхнего рядов – "стоячие" (рис. 15, е) или квадратные.

В сердцевинных лучах тропических и некоторых наших пород (фисташка) располагаются камедные ходы, содержащие водорастворимые полисахариды и другие вещества.

**О с е в а я д р е в е с и н н а я п а р е н х и м а**, хотя и занимает значительно меньший объем, чем сердцевинные лучи, но у некоторых наших пород на ее долю приходится несколько процентов от общего объема древесины. Чаще встречаются так называемые тяжи древесинной паренхимы (рис. 15, ж), представляющие собой вертикальный ряд клеток, заполненных содержимым. Дугой тип древесной паренхимы – веретенovidная паренхима встречается реже (береза, липа, карагач). Веретенovidные паренхимные клетки обычно пустые, поэтому их труднее обнаружить.

На поперечном разрезе распределение древесной паренхимы различно. У одних пород оно не связано с расположением сосудов (например, у

клена, самшита, березы, бука), у других (например, у ясеня, бархатного дерева) паренхима группируется вблизи сосудов.

По особенностям микроскопического строения можно более точно, чем по внешним признакам, определить породу. Для этой цели можно использовать определитель А.Ф. Гаммермана и др. (1946); монографии В.Е. Вихрова [19], А.А. Яценко-Хмелевского [80], Е.С. Чавчавадзе [73]; атлас, содержащий материалы В.Е. Москалевой, З.Е. Брянцевой и других авторов (1976); атлас [4].

**Строение древесины корней.** Ткани ствола постепенно переходят в ткани корня. Строение древесины крупных корней имеет много общего со строением древесины ствола.

У хвойных пород основная масса древесины корней состоит также из ранних и поздних трахеид. Здесь также представлены сердцевинные лучи, древесная паренхима, имеются смоляные ходы. Однако корни не имеют сердцевины, в центре расположена первичная древесина с одним или несколькими смоляными ходами. В корнях обычно не образуется ядро. Граница между годичными слоями менее заметна, чем в стволе. Переход от ранней к поздней древесине в пределах каждого слоя более плавный из-за отсутствия резких сезонных колебаний температуры и влажности среды (почва).

Трахеиды во вторичной древесине корня, также как в древесине ствола, располагаются правильными радиальными рядами. Однако по данным В.Е. Вихрова и Л.В. Костаревой трахеиды имеют большую длину, крупные полости и тонкие стенки, снабженные окаймленными порами, которые располагаются не только в один, но и в два, а иногда и в три ряда (сосна, ель, пихта, лиственница). Окаймленные поры часто встречаются и на тангенциальных стенках поздних и ранних трахеид (за исключение можжевельника).

Серцевинные лучи в древесине корней более широкие и расположены гуще, чем в древесине ствола. В корнях ели, лиственницы и сосны встречаются сердцевинные лучи без горизонтальных трахеид. У пихты сердцевинные лучи имеют краевые паренхимные клетки, сильно вытянутые вдоль луча, с дугообразными внешними стенками. Смоляные ходы в древесине корней окружены большим количеством клеток сопровождающей паренхимы, образующих сплошные пояса или односторонние скопления. Древесина корней имеет меньшую плотность и прочность, чем древесина ствола.

У лиственных пород в древесине корней сильно развиты сосуды. По исследованиям В.Е. Вихрова и С.А. Туманян в крупных боковых корнях дуба нет ядра, древесина рассеяннососудистая, годичные слои узкие и плохо заметные, различия между ранней и поздней древесиной нет. В древесине корней дуба содержится большое количество древесной парен-

химы, клетки которой крупнее, чем у ствола. В центральной части корней сердцевины, состоящей только из паренхимных клеток, нет.

Исследования Л.А. Лебеденко показали, что у других пород этого семейства (бука, каштана) также наблюдаются заметные различия между строением древесины корней и ствола. В то же время у березы и ольхи древесина корней мало отличается по строению от древесины ствола.

### § 6. Микростроение сердцевины и коры

Микростроение всех частей ствола удобно представить, рассматривая поперечный разрез стебля побега (рис. 17). Расположенная в центре сердцевина состоит из паренхимных клеток округлой или многогранной формы с крупными полостями и тонкими стенками, имеющими большие простые поры. Вокруг сердцевины располагается образовавшаяся в первый год жизни побега первичная древесина, состоящая из мелких, плотно соединенных толстостенных клеток. Сердцевину вместе с окружающей ее первичной древесиной иногда называют сердцевинной трубкой.

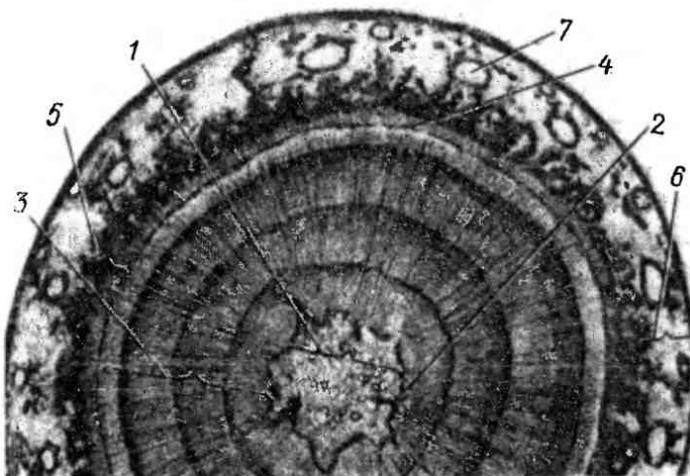


Рис. 17. Строение стебля четырехлетнего побега сосны на поперечном разрезе, ув. 21× [по 88]:

1 – сердцевина; 2 – первичная древесина; 3 – вторичная древесина; 4 – положение камбия; 5 – флоэма; 6 – первичная кора; 7 – смоляные ходы

Вторичная древесина, микростроение которой было рассмотрено выше, – продукт деятельности камбия, который откладывает не только клетки древесины (ксилемы), но и клетки луба (флоэмы). Луб представляет собой внутреннюю часть коры. Снаружи луб охватывает первичная кора, состоящая из крупных паренхимных клеток, среди которых

расположены вертикальные смоляные ходы. Обычно стебель побега одет перидермой (от греческих "пери" – около и "дерма" – кожа). Эта покровная ткань, сменившая тонкую кожицу, включает в себя пробковый камбий, отделяющий по направлению к поверхности стебля пробковые клетки, а вовнутрь (иногда) – паренхимные клетки. Во взрослом дереве кора имеет две четко выделяющиеся зоны: луб и корку. Луб, так же как и образованная камбием древесина, включает в себя анатомические элементы, выполняющие проводящую, механическую и запасающую функции.

Проводящую функцию в лубе выполняют с и т о в и д н ы е анатомические элементы. Ситовидные клетки характерны для луба хвойных пород; это узкие длинные клетки со скошенными концами, напоминающие трахеиды. На концах и боковых стенках расположены в виде эллипсов похожие на сита участки с многочисленными мелкими отверстиями. Ситовидные клетки смыкаются друг с другом по концам "внахлестку", образуя продольные ряды. Ситовидные трубки, представляющие собой проводящую ткань луба лиственных пород, напоминают сосуды. Членики ситовидных трубок отделены поперечными (иногда несколько наклонными) перегородками с множеством мелких отверстий, равномерно распределенных или собранных в группы. К ситовидным трубкам сбоку примыкают паренхимные клетки-спутницы. Ситовидные клетки и трубки в отличие от трахеид и сосудов древесины имеют нелигнифицированные целлюлозные оболочки и живой протопласт. Ситовидные элементы функционируют у большинства пород в течение одного сезона, а затем отмирают.

Ширина ситовидных клеток сосны (по данным И.С. Гелеса) 29–50 мкм, длина 2,5–5,9 мкм. Диаметр ситовидных трубок 20–30 мкм, длина члеников – несколько десятых миллиметра.

Отмершие ситовидные элементы сдавливаются окружающими тканями иногда до полного исчезновения полостей. На рис. 18 видно, что ситовидные клетки сохраняют свою форму только в зоне ( $a^1$ ) луба, примыкающей к камбию; в остальной, непроводящей, зоне  $a$  они смяты. Зона проводящего луба весьма мала, ее ширина составляет у разных пород 0,2–1,0 мм. Ситовидные элементы занимают 25–50 % площади проводящего луба [88].

Механическую функцию в лубе выполняют лубяные волокна и каменистые клетки. Лубяные волокна предохраняют от сдавливания расположенные среди них ситовидные элементы. Они похожи на волокна либриформа, также имеют толстые одревесневшие стенки с простыми порами и очень малые полости. У хвойных пород лубяных волокон сравнительно мало, а у сосны их вообще нет. Много лубяных волокон у липы, тополя, ивы и некоторых других лиственных пород. Лубяные волокна липы, толщина которых 0,03–0,25 мм, а длина 0,88–1,26 мм, образуют переплетающиеся между собой тяжи, охватывающие ствол в виде сетки.

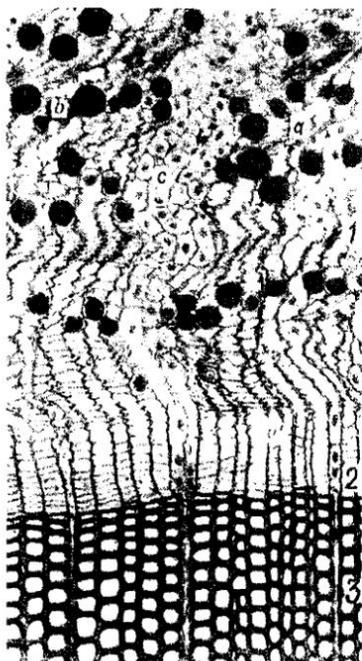


Рис. 18. Поперечный разрез луба сосны. Ув. 100× [по 88]:

1 – луб; 2 – камбий; 3 – древесина; а – непроводящая часть луба (ситовидные клетки сдавленные); а' – проводящая часть луба; б – группа паренхимных клеток; с – лубяной луч

Каменные клетки, имеющие вид многогранников, значительно короче, но обычно шире лубяных волокон, иногда они имеют ветвистую форму (у пихты). Свое название они получили за твердость стенок, которые сильно утолщены и пропитаны лигнином. Многочисленные поры в стенках – простые.

У некоторых пород механические функции в лубе выполняют одни каменные клетки (ель, лиственница, пихта, береза, бук, платан), у других пород они помогают в этой роли лубяным волокнам (дуб, ива, ольха, клен, ясень).

Запасующую функцию в лубе выполняют паренхимные клетки, которые, как и в древесине, образуют

две системы – горизонтальную (лубяные лучи) и вертикальную (лубяную паренхиму). Лубяные лучи, пересекающие луб в радиальном направлении, являются продолжением сердцевинных лучей. Иногда, например у сосны, встречаются разнородные лубяные лучи, состоящие из вытянутых по их длине (лежачих) и по высоте (стоячих) паренхимных клеток. Лежащие клетки расположены в середине луча, а стоячие – по краям (рис. 19). Клетки лубяных лучей обычно имеют недревесневшие стенки. По мере удаления от камбия ширина лубяных лучей увеличивается, что хорошо видно на поперечном разрезе луба липы (рис. 20). Лучи у хвойных пород в непроводящей зоне изгибаются (рис. 18). Некоторые из лучей пронизывают весь луб, другие, также начинаясь от камбия, до корки не доходят.

Лубяная паренхима может быть представлена веретеновидными клетками или тяжами. В определенное время года они накапливают крахмал; особенно заметными они становятся, когда содержат смолы или дубильные вещества (рис. 18). У некоторых пород (сосна) они располагаются отдельными группами, у других пород (липа) они вместе с ситовидными трубками образуют тангенциальные прослойки (на поперечном разрезе). Чередование этих прослоек с лентами волокон можно обнаружить в пламевидных участках луба, находящихся между лучами на поперечном разрезе коры липы (рис. 20). Стенки клеток лубяной паренхимы обычно не древеснеют. В лубе хвойных пород могут встречаться смоляные ходы.

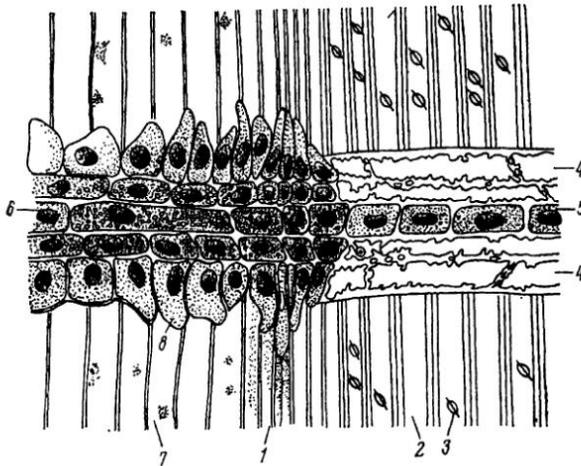


Рис. 19. Радиальный разрез ствола сосны у границы луба (слева) и древесины (справа):

1 – камбий; 2 – трахеида; 3 – окаймленная пора; 4 – горизонтальные трахеиды; 5 – паренхимная клетка сердцевинного луча; 6 – лежащая паренхимная клетка лубяного луча; 7 – ситовидная клетка; 8 – стоячая паренхимная клетка лубяного луча

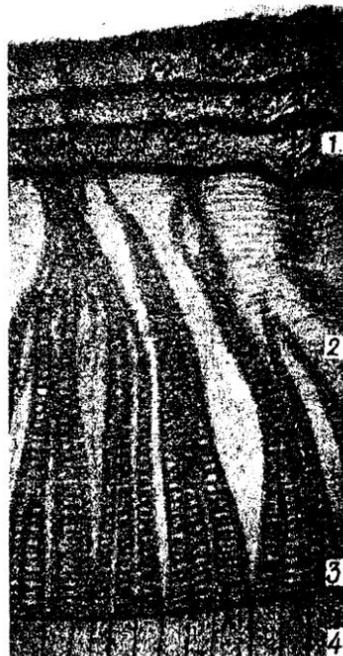
Рис. 20. Поперечный разрез коры липы.

Ув. 12х [по 88]:

1 – корка; 2 – луб с расширяющимися лучами; 3 – камбий; 4 – древесина

Корка содержит прослойки перидермы и участки заключенного между ними отмершего луба. Основная масса перидермы состоит из пробковых клеток.

Пробковые клетки имеют форму многогранников (в основном четырнадцатигранников), несколько вытянутых вдоль оси стебля и сплюснутых в радиальном направлении. Они располагаются радиальными рядами, очень плотно (без межклетников), и вскоре после образования отмирают. Это связано с отложением в их стенках с у б е р и н а. Субериновый слой аморфного строения накладывается на первичную целлюлозную оболочку, имею-



шую фибриллярную структуру. Прослойки суберина чередуются с прослойками воска, который и обеспечивает главным образом непроницаемость клеточных стенок (они не имеют пор) для воды и газов. Тонкостенные пробковые клетки, заполненные воздухом, обладают хорошими теплоизоляционными свойствами. Защитные функции корки в растущем дереве обусловлены в основном присутствием в ней пробковых клеток.

У некоторых пород (береза, бук) корка представлена только перидермой. Такие породы отличаются гладкой поверхностью коры. Газообмен между окружающей средой и внутренними частями ствола осуществляется через находящиеся в перидерме чечевички – структурные образования с неплотно расположенными клетками. Чечевички в виде темных узких поперечных полосок длиной 10 – 15 см хорошо видны на белой поверхности стволов березы.

У большинства пород, начиная с определенного возраста, пробковый камбий закладывается в глубине коры и образует слои перидермы.

В изолированные перидермой участки луба не могут поступать растворы питательных веществ, и они отмирают. Постепенно образуется корка, включающая целый комплекс отмерших тканей. На рис. 20 можно видеть корку липы с четырьмя прослойками перидермы.

Одновременно с ежегодным приращением корки изнутри происходит отпад наружных ее слоев обычно в виде чешуек. Однако на старых стволах у сосны и других пород, начиная с комлевой части, образуется толстый слой корки, изрезанный трещинами, размеры и количество которых постепенно увеличиваются. Толстый слой корки предохраняет ствол от обгорания при лесных пожарах. Особенно толстая корка у пробкового дуба и бархатного дерева. Корку этих деревьев (пробковое корье) периодически срезают и используют для технических целей.

### ГЛАВА 3. ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ

#### § 7. Химический состав древесины и коры

Древесина состоит в основном из органических веществ, на долю которых приходится не менее 99 % общей массы. Элементный химический состав древесины всех пород практически одинаков.

Органическая часть абсолютно сухой древесины содержит в среднем 49 – 50 % углерода, 43 – 44 % кислорода, около 6 % водорода и 0,1 – 0,3 % азота.

При сжигании древесины остается ее неорганическая часть – зола (0,1 – 1,0 %). В состав золы входят кальций, калий, натрий, магний, в меньших количествах фосфор, сера и другие элементы. Они образуют ми-

неральные вещества, бóльшая часть которых (75 – 90 %) нерастворима в воде. Среди растворимых веществ преобладают соли щелочных металлов – карбонаты калия и натрия, а из нерастворимых – соли кальция.

Схематически состав древесины можно представить в следующем виде:



Целлюлоза, лигнин и гемицеллюлозы, как уже отмечалось в гл. 2, – основные составляющие клеточных стенок древесины. Характер связей между ними весьма разнообразен – от слабых межмолекулярных до сильных – химических.

Представление о химическом составе древесины дают некоторые данные В.И. Шаркова [по 52], приведенные в табл. 6.

6. Химический состав древесины некоторых пород, %

Порода	Целлюлоза	Лигнин	Пентозаны	Гексозаны	Зола	Экстрактивные вещества, растворимые	
						в эфире	в воде
Сосна	41,9	25,5	6,0	14,1	0,2	3,2	3,9
Ель	44,1	28,9	5,1	15,6	0,2	0,9	2,1
Лиственница	34,5	26,7	6,5	22,1	0,2	1,1	12,9
Пихта	41,2	29,9	5,2	11,3	0,5	0,7	3,4
Бук	42,6	24,0	16,7	5,6	0,5	–	–
Береза	33,7	22,8	22,2	4,9	0,2	0,9	1,1
Осина	41,8	21,8	16,3	3,6	0,3	0,8	2,8

Древесина хвойных пород отличается от лиственных несколько большим содержанием лигнина и, особенно, гексозанов. У древесины лиственных пород среди гемицеллюлоз преобладают пентозаны. Только в составе экстрактивных веществ хвойной древесины содержатся смоляные кислоты.

В ранней зоне годичного слоя целлюлозы меньше, чем в поздней. Целлюлозы, лигнина и экстрактивных веществ в заболони хвойных пород меньше, чем в ядре. У некоторых лиственных пород (ясень, дуб) содержание целлюлозы в ядре несколько больше, чем в заболони.

В древесине ветвей содержание целлюлозы на 3–10 % меньше, чем в стволе [46]. По данным Л.П. Жеребова у сосновых ветвей в нижней части, испытывающей сжимающие нагрузки, содержание лигнина примерно на 5 % выше, чем в верхней части.

Кора по элементному химическому составу мало отличается от древесины, но количество минеральных веществ в ней больше, чем в древесине.

Так, в еловой коре, по данным ВНПОбумпрома, содержится, %: углерода 44, кислорода 45,4, водорода 6,4, азота 0,19 и золы 3,6. В состав золы входит, %: кальция 0,93, калия 0,37 и фосфора 0,76. В сосновой коре по данным И.П. Дейнеко углерода около 50 % (в корке 53 %, лубе 48 %), водорода 6 %, кислорода до 40 %, азота 0,4 % и золы 3–5 %.

Соотношение между основными органическими веществами в коре также иное, чем в древесине, здесь значительно меньше целлюлозы (особенно в корке). Кроме того, в наружной части коры содержится суберин, которого нет в древесине. Представление о химическом составе коры некоторых пород дают данные П. Лекса [85].

#### 7. Химический состав коры, %

Вещества	Сосна	Ель	Бук	Тополь	Береза	
					луб	корка**
Целлюлоза	16,6	19,1	11,8	–	19,0	–
Холоцеллюлоза*	25,7	27,2	20,9	39,7	38,7	4,5
Лигнин	23,9	12,8	17,7	21,0	20,3	1,3
Экстрактивные	73,6	69,3	60,0	42,3	15,4	43,7
Зола	1,6	2,8	4,0	2,8	–	–

\* Холоцеллюлоза включает целлюлозу и гемицеллюлозы.

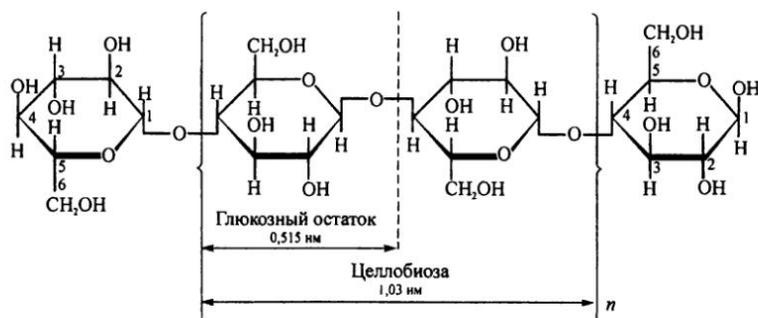
\*\* Дополнительно содержит более 30 % суберина.

При рассмотрении таблиц 6 и 7 следует учитывать, что из-за дифференцированного определения отдельных компонентов древесины и коры суммарный состав может отличаться от 100 %.

#### § 8. Характеристика органических веществ древесины и коры

**Целлюлоза.** Это вещество представляет собой линейный полимер – полисахарид, который, как и крахмал, имеет формулу  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , где  $n$  – степень полимеризации. Макромолекула целлюлозы имеет вид цепи, состоящей из множества элементарных звеньев – глюкозных остатков. Число этих звеньев, характеризующее степень полимеризации, у природной древесной целлюлозы находится в пределах 5000 – 10000, а по некоторым данным может достигать и больших значений.

Каждая пара связанных между собой глюкозных остатков образует целлобиозу. Структурная формула целлюлозы имеет вид:



В целлобиозе глюкозные остатки расположены под углом  $180^\circ$ , и первый углеродный атом одного из них связан с четвертым углеродным атомом соседнего звена. Длина одного глюкозного остатка 0,515 нм, а вся макромолекула имеет длину 3 – 5 мкм. Поперечные размеры молекулы целлюлозы, согласно Фрей-Висслингу, 0,4 – 0,8 нм.

Строение целлюлозы рассматривают на четырех уровнях: молекулярном, надмолекулярном, субмикроскопическом и микроскопическом. Характеризуя строение целлюлозы на молекулярном уровне, отметим, что элементарное звено целлюлозы не плоское; его атомы занимают различное положение по отношению друг к другу, образуя сложную пространственную структуру (конформацию).

Существование различных конформаций отдельных участков цепи целлюлозы, а также межмолекулярное взаимодействие, обусловленное в основном водородными связями, объясняет сложный характер надмолекулярных структур и их многообразие. Рентгенографические исследования показали, что значительная часть целлюлозы обладает упорядоченной (кристаллической) структурой. Отношение кристаллической части целлюлозы к ее общей массе у древесной целлюлозы может достигать 76 % [46].

Кристаллическая ячейка целлюлозы, согласно модели Мейера и Миша, состоит из пяти параллельных целлобиозных единиц, организованных в моноклинную систему, и имеет длину 1,03 нм.

Более крупные целлюлозные образования (элементарные фибриллы, микро- и макрофибриллы) были описаны в гл. 2 при рассмотрении структуры клеточной стенки древесины.

Регулярность строения цепи макромолекулы и значительное внутри- и межмолекулярное взаимодействие проявляются в том, что целлюлоза имеет особые свойства по сравнению с другими линейными полимерами. Так, при нагревании до температуры разложения целлюлоза сохраняет свойства стеклообразного тела, которому свойственны преимущественно упругие деформации. Целлюлоза весьма химически стойкое вещество, она не растворяется в воде и большинстве органических растворителей.

По химической природе целлюлоза представляет собой полиатомный спирт, так как молекула ее содержит группы  $\text{CH}_2\text{OH}$  и  $\text{CNOH}$ . Благодаря наличию гидроксильных она вступает в реакцию со щелочными металлами и основаниями. При действии на целлюлозу щелочей одновременно с химической реакцией протекают и физико-химические процессы: набухание, растворение низкомолекулярных фракций и структурные превращения.

Глюкозидные связи между элементарными звеньями в макромолекуле обуславливают малую устойчивость целлюлозы к действию кислот. В присутствии кислот происходит гидролиз целлюлозы с разрушением цепей макромолекул.

Гидроксильные группы, находящиеся в элементарных звеньях макромолекулы, обеспечивают возможность образования таких производных целлюлозы, как ее простые (метилцеллюлоза, этилцеллюлоза и др.) и сложные (нитраты целлюлозы, ацетаты целлюлозы и др.) эфиры.

Целлюлоза сравнительно легко поддается модификации. Путем модификации ее можно превратить в разветвленный или сшитый полимер. Это вещество белого цвета с плотностью порядка  $1,54 - 1,58 \text{ г/см}^3$ .

**Гемицеллюлозы.** Этим термином объединяется группа полисахаридов [21], содержащихся в клеточных стенках древесины, но отличающихся от целлюлозы большей гидролизуемостью в кислотах и растворимостью в щелочах.

В указанную группу входят пентозаны и гексозаны, которые в свою очередь делятся на отдельные разновидности полисахаридов (маннаны, ксиланы, галактаны и др.).

Пентозаны  $(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4)_n$  содержат пять атомов углерода в составе элементарного звена. Гексозаны  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ , так же как и целлюлоза, имеют шесть атомов углерода в звене. Однако молекулярная масса всех гемицеллюлоз значительно меньше, чем у целлюлозы. Обычно степень полимеризации составляет 150 – 200, но могут быть гемицеллюлозы с еще меньшей степенью полимеризации (до 30).

По последним данным гемицеллюлозы представляют собой не столько так называемые гомополимеры, состоящие из одинаковых элементарных звеньев, сколько сополимеры, включающие разные звенья.

Среди сополимеров известен, например, растворимый в воде арабиногалактан, содержание которого в древесине лиственницы доходит до 25 %.

В древесине могут содержаться также другие смешанные полисахариды, в том числе и продукты взаимодействия полисахаридов с урановыми веществами (урановыми кислотами, пектинами). Весь углеводный комплекс древесины (без лигнина) носит название *х о л о ц е л л ю л о з а*.

**Лигнин.** Это высокомолекулярное соединение ароматической природы (полифенол) представляет собой аморфный полимер сложной структурной организации. Строение лигнина, находящегося в составе клеточных

стенок древесины и коры, до сих пор окончательно не установлено. Дело в том, что в процессе выделения из древесины природный лигнин претерпевает необратимые превращения. Лигнин, выделенный разными способами отличается по строению и свойствам. Об этом можно судить хотя бы по цвету выделенного лигнина, который может быть от светло-желтого до темно-коричневого, в то время как природный лигнин, очевидно, соответствует цвету древесины. Плотность отдельных видов выделенного лигнина колеблется в пределах  $1,25-1,45 \text{ г/см}^3$  [8].

По химическому составу лигнин, выделенный из древесины хвойных и лиственных пород, не одинаков.

В отличие от целлюлозы лигнин имеет ароматическую природу, содержит двойные связи, метоксильные  $\text{OCH}_3$ - группы, карбонильные  $\text{CO}$ - группы и др.

Для лигнина характерна значительная полидисперсность, молекулярные массы выделенных из ели лигнинов колеблются от  $1 \cdot 10^3$  до  $146 \cdot 10^3$ . Элементный состав лигнина из древесины сосны, ели, лиственницы [по 8], в среднем равен, %: углерода 63, водорода 6 и кислорода 31, т. е. в лигнине по сравнению с целлюлозой содержится значительно больше углерода и меньше кислорода.

Лигнин химически менее стоек, чем целлюлоза. Это используется для выделения целлюлозы из древесины. Природный лигнин легко окисляется, взаимодействует с хлором, растворяется при нагревании в щелочах, водных растворах сернистой кислоты и ее кислых солей.

По поводу характера связей между лигнином и углеводами нет единого мнения. Большинство исследователей считает, что существуют химические лигноуглеводные связи. Однако окончательно этот вопрос не решен, поскольку, очевидно, имеются различия в характере связи лигнина в срединной пластинке и вторичной оболочке клеточной стенки. Не ясен так же вопрос о том, весь ли лигнин связан с углеводами и все ли углеводы связаны с лигнином.

**Суберин.** Это смесь веществ – сложных эфиров алифатических длинноцепочных гидрооксикислот. Суберин находится только в коре и вызывает опробковение клеточных стенок корки.

**Экстрактивные вещества.** В эту группу входят вещества, которые могут быть извлечены из древесины и коры путем экстракции водой или органическими растворителями.

Водой экстрагируются дубильные и красящие вещества, камеди.

**Дубильные вещества, танины (таниды)** – соединения (смесь) представляющие собой многоатомные фенолы. Они используются для выделки кож (дубления) из сырых шкур животных. Обладают вяжущим вкусом, осаждают белки и алкалоиды из разбавленных растворов. Разделяются на гидролизуемые и конденсированные. Первые – представляют собой сложные эфиры сахаридов и фенолкарбоновых кислот. Вто-

рые – относятся к флавоноидам; при действии минеральных кислот образуют красно–коричневые продукты конденсации. Дубление придает коже эластичность, мягкость, ненабухаемость в воде, стойкость против гниения.

К а м е д и представляют собой водо–растворимые смолообразные вещества, состоящие в основном из полисахаридов (арабиногалактана и др.). К р а с я щ и е в е щ е с т в а желтого, коричневого, красного и синего цвета содержатся в полостях клеток древесины (особенно в ядре) и коры.

Органическими растворителями (эфиром, спиртом, ацетоном, бензолом и др.) из древесины могут быть выделены разнообразные по химическому составу вещества: смоляные и жирные кислоты, жиры, воски, стерины и др. Количество экстрагируемых продуктов зависит от породы, вида растворителя и условий экстракции.

С м о л ы , находящиеся в древесине и коре хвойных пород, содержат в природном состоянии около 40 % терпенов и смоляных кислот. Выделяющаяся при ранении ствола ж и в и ц а по своему составу отличается от смолы, находящейся в смоломестилищах дерева. Терпены (монотерпены), общая формула которых  $C_{10}H_{16}$ , являются жидкими веществами. Они составляют основу технического продукта – с к и п и д р а . Живица кроме жидкой, легко подвижной и летучей (с водяным паром), части содержит смоляную часть, представляющую собой трудно делимую смесь смоляных кислот с общей формулой  $C_{20}H_{30}O_2$ . При уваривании живицы образуется другой технический продукт – к а н и ф о л ь .

Кроме того в древесине хвойных и лиственных пород содержится небольшое количество жирных кислот: олеиновой, линолевой и др.

В нейтральной части экстракта содержатся в основном жиры, а также стерины, представляющие собой биологически активные ненасыщенные спирты. Они выделяются в виде фитостерина – кристаллического продукта, используемого в медицине.

В состав коры ряда пород кроме упомянутых экстрактивных веществ входят алкалоиды (хинин, стрихнин и др.) и витамины (С, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub> и др.).

Древесина преимущественно тропических пород содержит я д о в и т ы е в е щ е с т в а . При шлифовании и других видах механической обработки такой древесины образующаяся пыль, мелкие опилки могут вызвать отравления, кожные заболевания.

Входящие в состав древесины танины, смолы и эфирные масла содержат легколетучие вещества, обуславливающие ее з а п а х . Особенно сильным запахом обладают хвойные породы. У некоторых инородных лиственных пород (сандаловое и камфарное дерево, австралийская акация, анисовое дерево) древесина имеет особо приятный запах. По мере высыхания свежесрубленной древесины запах ослабевает. Изменение запаха часто свидетельствует о начавшемся процессе загнивания древесины от воздействия грибов. Пораженная бактериями древесина также приобретает специфический запах. Так, пораженная анаэробными бактериями ядровая дре-

весина дуба имеет сильный уксусный и прогорклый запах. Такая древесина при обычной камерной сушке растрескивается больше здоровой.

### § 9. Древесина, кора и древесная зелень как химическое сырье

**Получение и использование целлюлозных материалов.** В основе ряда широко применяемых материалов лежит целлюлоза, выпуск которой в мире достиг 200 млн. т. Ее можно получить, удалив из клеточных стенок древесины все остальные вещества. В процессах варки, воздействуя на древесину различными агентами, растворяют сопровождающие целлюлозу вещества, отличающиеся меньшей химической стойкостью. В промышленности используются кислотные, щелочные и нейтральные способы получения целлюлозы. [45]

**Кислотные способы.** К этой группе относятся сульфитный и бисульфитный способы. Сульфитный способ до недавнего времени имел у нас наибольшее распространение. При этом способе в качестве сырья используется древесина малосмолистых хвойных пород (ели, пихты) и ряда лиственных пород.

Короткие окоренные бревна (балансы), а также отходы лесопиления и лесозаготовок на рубильных машинах перерабатываются в щепу длиной 15–25 мм и толщиной до 5 мм. Отсортированная, однородная по размерам, щепа загружается в вертикальные варочные котлы вместимостью до 400 м<sup>3</sup>. В котел подается так называемая сульфитная варочная кислота, представляющая собой раствор сернистой кислоты, содержащий бисульфит кальция  $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ . Кальциевое основание (CaO) в последнее время заменяют магниевым, натриевым или аммонийным. Варка ведется при 130–150 °С и давлении 0,5–1 МПа в течение 5–12 ч. Основная задача варки заключается в делигнификации древесины. Во время варки происходит также частичный гидролиз гемицеллюлоз и другие процессы. В результате варки получают целлюлозную массу и перешедшие в раствор остальные органические вещества – сульфитный щелок. Содержимое котла вымывают или выдувают в щежу или приемный резервуар. Здесь происходит отделение щелока от целлюлозы и ее промывка. Далее целлюлозную массу очищают от непроваренной щепы, песка и других примесей. Для некоторых производств необходима особо чистая целлюлоза, поэтому ее дополнительно облагораживают, обрабатывая раствором NaOH для удаления остатков гемицеллюлоз, лигнина, золы и смолы. Обычно такой процесс облагораживания сочетают с отбеливанием целлюлозы хлорсодержащими агентами или перекисью водорода. В.М. Никитин и Г.Л. Аким разработали способ отбеливания целлюлозы молекулярным кислородом в щелочной среде. Затем целлюлозную массу обезвоживают и на специальной машине превращают в непрерывную плотную ленту влажностью 8–12 %. Эту ленту

разрезают на листы 600×800 мм, упаковывают в пачки и отправляют на другие предприятия (бумажные фабрики и т. д.).

Сульфитный щелок используют для получения белковых кормовых дрожжей, этанола и других продуктов. Химической переработкой из щелока можно получать ванилин, фенолы, ароматические кислоты. Технические лигносульфонаты из щелока, упаренного после биохимической переработки, находят применение в производстве цемента и бетона, при изготовлении литейных форм, стержней и для других целей.

Среди недостатков сульфитного способа, непригодного для варки древесины высокосмолистых пород, – отсутствие достаточной регенерации химикатов из отработанных щелоков, что приводит к загрязнению водоемов; длительность процесса; необходимость кислотостойкого оборудования.

Бисульфитный способ позволяет использовать для получения целлюлозы древесину практически любых пород. Варка щепы проводится в водном растворе бисульфита натрия, магния или аммония. Оборудование и технология во многом схожи с применяемыми при сульфитном способе. Однако температура процесса варки выше (155–165 °С). К числу недостатков относятся: ограниченная возможность биохимической переработки отработанного щелока из-за низкого содержания в них простейших сахаров, а также недостатки, указанные для сульфитного способа.

**Щелочные способы.** К этой группе относятся сульфатный и натронный способы. Наибольшее распространение получил первый из них. Для получения целлюлозы сульфатным способом может быть использована древесина любых пород, в том числе и высокосмолистых (сосна и др.). Измельченная в щепу древесина варится в растворе, содержащем гидроксид натрия NaOH и в 3 раза меньше сульфида натрия Na<sub>2</sub>S. Варка ведется в котлах вместимостью 75–160 м<sup>3</sup> при 170–180 °С и давлении 0,7–1,2 МПа в течение 2–5 ч. По окончании процесса варочный раствор приобретает черный цвет и называется черным щелоком. Черный щелок упаривают для компенсации потерь Na<sub>2</sub>S, смешивают с сульфатом натрия Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и прокаливают. При этом органическая часть щелока сгорает (используется как топливо), а минеральная употребляется для приготовления свежего варочного раствора (белого щелока). Остальные операции такие же, как и при получении сульфитной целлюлозы. Для получения высококачественной целлюлозы, идущей на химическую переработку, древесину подвергают предгидролизу (пропаркой, водной варкой при 170 °С или другим способом) с целью удаления большей части гемицеллюлоз.

Сульфатный способ позволяет получать более прочные волокна, необходимые для производства корда и других целей. К достоинствам этого способа также относится предусмотренная технологией регенерация щело-

ка. Это дает возможность проводить процесс по замкнутой схеме, уменьшая загрязнение окружающей среды.

В качестве побочных продуктов при сульфатном производстве целлюлозы улавливают скипидар и снимают с поверхности охлажденного щелока сульфатное мыло, разложение которого минеральной кислотой дает талловое масло. Из него получают канифоль (см. ниже) и другие продукты, используемые в медицине, лакокрасочной, горнодобывающей и других отраслях промышленности. Часть щелочного лигнина так же может найти промышленное использование.

Второй щелочной способ получения целлюлозы – натронный основан на применении в качестве реагента гидроксида натрия; потери щелочи возмещаются добавкой соды. Этот способ находит сравнительно небольшое применение, главным образом, при переработке древесины лиственных пород.

Нейтральный способ. Этот способ используется, для получения из древесины лиственных пород целлюлозы с весьма большим содержанием сопутствующих веществ. Варочный раствор, содержащий сульфит натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  или сульфит аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  имеет близкую к нейтральной реакцию, и поэтому способ теперь называют моносульфитным или, чаще, нейтрально-сульфитным. Варка проводится в котлах периодического или непрерывного действия при конечной температуре 160–180 °С, давлении 0,65–1,25 МПа и длится 0,2–6 ч. Основной недостаток – невозможность использования древесины хвойных пород. Эффективных промышленных способов утилизации моносульфитных щелоков пока не найдено.

Для всех применяемых в промышленности способов получения целлюлозы характерно образование отходов, в той или иной мере загрязняющих окружающую среду соединениями серы. Поэтому особенно важны разработки бессернистой технологии целлюлозы. Например, в последнее время при щелочной варке в качестве агента делигнификации используют антрахинон, получаемый из нефтяного или каменноугольного сырья.

Промышленность выпускает техническую целлюлозу с различной величиной выхода продукта из сырья. Целлюлоза нормального выхода (40–50 % массы сырья) находит широкое применение в бумажном производстве и ряде отраслей химической промышленности. Целлюлоза высокого выхода (50–60 %), содержащая значительную часть лигнина, гемицеллюлоз и другие вещества, получается при сокращенной продолжительности варки и пониженной температуре процесса. Этот продукт используют для производства различных видов картона и бумаги. Полуцеллюлоза – волокнистый полуфабрикат (выход 60–80 %), содержащий еще больше нецеллюлозных веществ; его получают путем неглубокой химической переработки сырья и последующего размо-

ла. Полуцеллюлозу используют для выработки тарного и других видов картона, а также низких сортов бумаги.

В бумажном производстве находит также применение полуфабрикат – древесная масса: химическая, белая и бурая.

Химическая древесная масса получается примерно так же, как и полуцеллюлоза, но отличается от нее более высоким выходом (85–92 %). Белую древесную массу получают, подвергая балансы только механической переработке. В дефибрерах балансы прижимаются к абразивной поверхности быстро вращающегося цилиндрического камня, и в присутствии воды происходит истирание древесины. Волокна при этом изламываются, но образующаяся масса сохраняет натуральный цвет древесины. Белая древесная масса в сочетании с длиноволокнистой целлюлозой применяется в производстве массовых видов бумаги. Если перед истиранием древесины пропарить, получается бурая древесная масса, отличающаяся более длинными волокнами, но темным цветом. Она используется для выработки оборточной бумаги и картона. Выход древесной массы составляет 95–98 %.

Многообразное и широкое применение в химической промышленности находят производные целлюлозы. При взаимодействии целлюлозы с 18–20 %–ным раствором гидроксида натрия получают щелочную целлюлозу. После измельчения и предварительного созревания на нее воздействуют сероуглеродом и получают ксантогенат целлюлозы. Путем растворения его в слабом растворе гидроксида натрия получают вязкий раствор – вискозу. После выдержки, многократной фильтрации и удаления воздуха вискозу продавливают через фильеры с мелкими отверстиями в осадительные ванны. В ваннах под воздействием водного раствора серной кислоты и сернокислых солей выделяются пучки тонких волокон гидратцеллюлозы, которые растягивают, скручивают и полученные нити используют для изготовления искусственного шелка. Если отдельные нити объединяют в жгут, который разрезают на короткие отрезки (штапельки), то получают штапельное волокно.

Вискозные кордные нити, отличающиеся высокой прочностью, применяют для изготовления ткани, создающей каркас автомобильных и авиационных шин, транспортерных лент и т. д. Продавливая вискозу через фильеры с отверстиями в виде щели, получают целлофановую пленку. Из вискозы получают и другие неволокнистые материалы.

В результате взаимодействия целлюлозы со смесью азотной и серной кислот получают нитраты целлюлозы. Свойства и области применения этих сложных эфиров целлюлозы зависят от содержания азота, которое может составлять 10–14 %. Растворы нитратов целлюлозы с малым содержанием азота (коллоксилин) применяют для производства целлулоида, различных видов кино- и фотопленки, нитролаков, нитроклея и других

продуктов. Из нитратов целлюлозы с высоким содержанием азота (пироксилина) изготавливают бездымный порох.

При взаимодействии целлюлозы с уксусным ангидридом образуются ацетаты целлюлозы. Уксуснокислые эфиры целлюлозы используются в производстве негорючих кино- фотопленок, пластмасс, лаков и ацетатных волокон. Ткани, изготовленные из этих волокон, эластичны, водостойки, не мнутся. Однако они сильно электризуются и мало устойчивы к истиранию.

Искусственное волокно получают также из медноаммиачного раствора облагороженной целлюлозы. Медноаммиачные волокна очень тонкие (в 2 раза тоньше нитей паутины), стойки к органическим растворителям, но ткани из них легко сминаются и истираются. Путем прививки к целлюлозе других полимеров или химическими превращениями функциональных групп в ее макромолекуле З.А. Роговиным и сотрудниками получены волокна, обладающие повышенной устойчивостью к истиранию, действию света, огня и микроорганизмов.

Из модифицированных целлюлозных волокон изготавливают маслостойкие и водоотталкивающие ткани, ионообменные материалы для улавливания золота, серебра из растворов, ртути из сточных вод и т. д.; антимикробные материалы, кровоостанавливающую марлю и др.

Простые эфиры целлюлозы (этилцеллюлоза, безиллцеллюлоза, метилцеллюлоза и др.) также находят применение в разных отраслях промышленности. Термопластичные материалы на базе простых и сложных эфиров целлюлозы – этролы используются в самолето- и автостроении.

**Гидролиз древесины.** При взаимодействии водных растворов кислот с древесиной происходит гидролиз ее полисахаридной части [72]. Целлюлоза и гемицеллюлозы при гидролизе превращаются в простые сахара. Эти сахара (например, глюкоза, ксилоза и др.) можно подвергать химической переработке, получая такие продукты, как ксилит, сорбит и др. Однако гидролизная промышленность ориентируется в основном на последующую биохимическую переработку сахаров. Современное гидролизное предприятие включает в себя целый комплекс химических производств, позволяющих утилизировать и побочные продукты. Сырьем для гидролизной промышленности служат главным образом отходы лесопиления и деревообработки, низкокачественная древесина (дрова). Технологические опилки (ГОСТ 18320–78) сразу подвергаются гидролизу. Крупномерные отходы и дрова предварительно измельчаются в технологическую щепу толщиной до 5 мм и длиной 5–35 мм.

В промышленности применяется способ гидролиза разбавленной до 0,5–0,6 % серной кислотой. Сырье в виде смеси опилок и щепы поступает в гидролизный аппарат вместимостью 18–160 м<sup>3</sup>. Сюда же подается горячий раствор серной кислоты. При 140–160 °С происходит осахаривание (гид-

ролиз) гемицеллюлоз. Затем при 180–190 °С начинается гидролиз целлюлозы. Одновременно с подачей серной кислоты отбирают гидролизат – кислый водный раствор простых сахаров. В конце процесса в гидролизат-аппарат подается горячая вода для удаления сахаров и серной кислоты, пропитывающих нерастворимый остаток – лигнин.

Нейтрализованный известковым молоком гидролизат (сусло) поступает в бродильное отделение. Там под действием ферментов винокурных дрожжей содержащиеся в сусле гексозы (глюкоза и сахара из гексозан) сбраживаются и образуют этиловый спирт (этанол), а также углекислый газ, который улавливается и используется для получения жидкой углекислоты и сухого льда.

До последнего времени наиболее крупным потребителем этанола была промышленность синтетического каучука. Однако современные методы производства каучука позволяют обходиться без этанола. Тем не менее потребность в нем как растворителе для различных отраслей промышленности растет. Весьма перспективно использование этанола в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания.

Остатки после отгонки спирта (барда) содержат неразложившиеся пентозы, которые, используются для выращивания кормовых дрожжей, богатых витаминами и белком. Введение дрожжей в виде добавки в рацион питания животных и птиц резко сокращает их падеж, повышает сопротивляемость заболеваниям, скорость прироста мяса, удои, жирность молока, качество меха и т. д.

В связи с возросшей потребностью в кормовых дрожжах прежние основные источники питательных сред для их выращивания (барда гидролизных, а также сульфитно-спиртовых заводов целлюлозных предприятий) оказались недостаточными. Поэтому на отдельных предприятиях технологический процесс не предусматривает получения этилового спирта. Весь гидролизат, включающий как гексозы, так и пентозы, используется для выращивания кормовых дрожжей. В дрожжерастильные аппараты подают сусло, в котором растворены минеральные питательные соли, содержащие азот, фосфор, калий, засевные дрожжи чистой культуры, а также воздух для обеспечения жизнедеятельности микроорганизмов. Выращенные дрожжи непрерывно отводятся из аппарата в виде суспензии. После флотации, сепарирования, выпаривания, сушки получают сухой товарный продукт. Дрожжи выпускаются в виде порошка коричневого цвета с содержанием белка не менее 35 %. Они используются также при изготовлении премиксов – смеси биологически активных веществ с наполнителем.

При гидролизе лиственной древесины и другого пентозаносодержащего сырья более концентрированной (10–15 %) серной кислотой получают фурфурол, представляющий собой маслянистую жидкость с запахом печеного хлеба. Он применяется в производстве пластмасс, синтетических волокон (нейлона), смол, для очистки смазочных масел, изготовления

медицинских препаратов (фурацилина и др.), красителей, средств для борьбы с сорняками, грибами и насекомыми и для других целей.

Побочный продукт гидролиза – лигнин используется в качестве сорбента в промышленности, медицине, понизителя вязкости бурильных растворов, топлива, для производства удобрений. Однако пока утилизируется 10 % лигнина.

Кроме традиционного кислотокатализируемого гидролиза ограничено применяют автогидролиз (без добавления кислоты) и ферментативный гидролиз. Перспективно применение взрывного автогидролиза (кратковременное воздействие водяного пара при температуре 200–240 °С и последующий мгновенный сброс давления) и, особенно, экологически чистого и малозергоемкого ферментативного гидролиза – разложения целлюлозы под действием биологических катализаторов.

В Японии находят распространение ожигение древесины (преимущественно низкокачественной) и коры. Для этого проводят гидролиз и другие химические процессы разложения древесины, получая смесь веществ, которая используется для производства полимерных материалов.

**Термическое разложение древесины и коры.** Разложение древесины (и коры) под действием высокой температуры происходит во многих процессах лесохимических производств [61]. Широко известен процесс пиролиза древесины при нагревании ее без доступа воздуха. При ограниченном доступе воздуха происходит ее газификация. Если воздух подается в избыточных количествах совершается сжигание древесины.

*Пиролиз древесины и коры.* В начале (при температуре  $t = 120\text{--}150$  °С) происходит потеря воды, затем частичное разложение древесины ( $t = 150\text{--}275$  °С). Главные реакции распада вещества древесины совершаются при 275–450 °С с бурным выделением тепла. Последняя стадия при 450–550 °С происходит с дополнительным подводом тепла извне. В результате пиролиза образуется уголь, жижка, газы.

Древесный уголь содержит 80–97 % углерода, при сжигании дает вдвое больше тепла, чем древесина, отличается малой зольностью, почти не содержит вредных примесей, обладает высокой сорбционной способностью. Это основной продукт пиролиза. Главные области применения: производство полупроводников (из кристаллического кремния) и сероуглерода; очистка вод и растворов (активированный паром уголь).

Жижка – раствор продуктов разложения древесины; при отстаивании образуются два слоя: верхний – водный и нижний – смоляной. Изстойкой и растворенной в сырой жижке смолы получают антиокислитель бензина, антисептики (креозот) и другие продукты. Из водного слоя жижки выделяют уксусную кислоту, метиловый спирт, ацетон и другие растворители. В последние годы значение жидких продуктов пиролиза снизилось; они используются главным образом в качестве топлива.

Газы, образующиеся при пиролизе древесины, используют в качестве топлива для обогрева реторт – аппаратов пиролиза.

При пиролизе древесины и коры выход основных продуктов зависит от породы, о чем свидетельствуют данные В.Н. Козлова [по 46], представленные в табл. 8. Кора при сухой перегонке по сравнению с древесиной дает больше смолы, угля и газов, но меньше уксусной кислоты и метилового спирта.

#### 8. Выход основных продуктов при пиролизе древесины и коры

Продукт	Выход, % от массы абс. сух. сырья		Продукт	Выход, % от массы абс. сух. сырья	
	Сосна	Берёза		Сосна	Берёза
Уголь	37,9/42,5	33,0/37,4	Метиловый спирт	0,85/0,31	1,6/0,69
Газы	18,2/19,8	15,3/18,5	Смола	7,0/8,4	6,3/14,9
Уксусная кислота	3,1/0,85	6,9/2,55			

Примечание. В числителе выход при пиролизе древесины, в знаменателе – коры

Технические условия на сырье для пиролиза и углежжения в виде круглых или колотых поленьев регламентированы ГОСТ 24260–80.

*Газификация древесины* происходит при воздействии воздуха или его смеси с паром. Температура в зоне газификации выше 800 °С. Кроме газообразных получают жидкие продукты (10 %). Основная цель – получение горючих газов.

Перспективные направления термической переработки древесины – ее карбонизация (получение угля), производство жидкого и газообразного топлива.

*Сжигание древесины и коры.* Качество древесины как топлива оценивается теплотой сгорания. Этот показатель представляет собой количество тепла, выделяющееся при полном сгорании 1 кг древесины. Низшую (без учета тепла, образующегося при конденсации водяных паров) теплоту сгорания,  $Q$  кДж/кг можно определить по формуле Д.И. Менделеева, которая применительно к древесине имеет вид:

$$Q_H = 339 C + 1031 H - 109 O - 25 W_{отн}, \quad (1)$$

где  $C$ ,  $H$  и  $O$  – содержание углерода, водорода и кислорода, %.

$W_{отн}$  – относительная влажность древесины, %.

Вычисленные по указанной формуле значения отличаются от действительных на 5–10 %. Теплота сгорания единицы массы древесины почти не зависит от породы, так как элементный химический состав древесины различных пород примерно одинаков. У абсолютно сухой древесины теплота сгорания колеблется в пределах 19,6–21,4 МДж/кг, причем у хвойных

пород она несколько выше, чем у лиственных. Для сравнения укажем, что теплота сгорания, МДж/кг\*, торфа 23, антрацита 30, мазута 40.

С повышением влажности топлива теплота сгорания снижается, и у свежесрубленной древесины она, по крайней мере, в 2 раза меньше, чем у абсолютно сухой.

Теплота сгорания коры примерно такая же, как у древесины соответствующей породы. Однако наружная часть коры березы имеет теплоту сгорания 35 МДж/кг. Сжигание коры возможно при влажности менее 70%. Теплота сгорания единицы объема, м<sup>3</sup> древесины может быть получена умножением  $Q_n$  на плотность древесины. Поскольку плотность древесины у разных пород различна, теплота сгорания единицы объема древесины существенно зависит от породы.

Наивысшая температура при идеальных условиях горения (жаро-производительная способность древесины) теоретически составляет 1550 °С. Однако практически из-за потерь в топке такая температура не может быть достигнута; действительная температура горения древесины принимается равной 1000–1100 °С.

В отличие от каменного угля и нефти древесина при сжигании не образует сернистых соединений, загрязняющих окружающую среду. Требования к качеству дров для отопления отражены в ГОСТ 3243–46.

**Получение и использование экстрактивных веществ из древесины и коры.** Прижизненное извлечение смолы (живицы) из древесины хвойных пород достигается путем подсочки.

Осенью на очищенном от грубой коры участке поверхности ствола сосны и кедра нарезают вертикальный желобок (рис. 21), а весной через каждые 3–5 дней снимают направленные под углом 30–45 °к желобку полоски коры и древесины, образуя подновки глубиной 5 мм. Рана, наносимая дереву при подсочке носит название карра. Из перерезанных смоляных ходов находящаяся в них под давлением 1–2 МПа живица вытекает в подновки и по желобку направляется в приемник. Сбор живицы из приемника производят 1–2 раза в месяц. Сезон подсочки составляет 4–6 мес. В среднем с одного соснового дерева получают 1,5 кг живицы за сезон. Наиболее смолопродуктивна сосна крымская. Для увеличения выхода живицы применяют химические стимуляторы, которыми смазывают подновки.

В наибольших количествах добывают сосновую живицу, представляющую собой прозрачную смолистую жидкость с характерным скипидарным запахом. На воздухе живица мутнеет, твердеет и превращается в хрупкую белесоватую массу – барас. Полученная в результате подсочки сосновая живица содержит примерно 75 % канифоли и около 20 % скипидара, остальное составляют вода и механические примеси.

---

\* 1 МДж = 10<sup>6</sup> Дж = 239 ккал

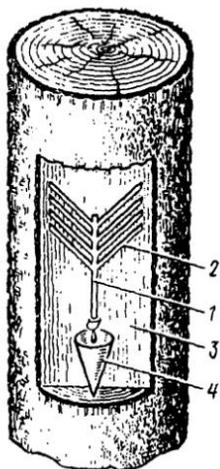


Рис. 21. Схема подсоски сосны:  
1 – желобок; 2 – подновки; 3 – карра; 4 – приемник

Кедровой живицы добывается значительно меньше, чем сосновой. Подсоска ели и лиственницы в широких промышленных масштабах пока не ведется. Однако собирают еловую серку – застывшую живицу с пораненных деревьев. Ее используют для извлечения смолистых веществ, применяемых в производстве морозостойкого бетона, а также пенобетонов. Добываемая в небольших количествах лиственничная живица не кристаллизуется при хранении; она используется как сырье для изготовления лучших сортов лаков и красок, для медицинских целей и т. д. Получают живицу и из пихты, но не из древесины, в которой нет смоляных ходов, а из коры. В первичной коре, в месте разрывов смоляных ходов, образуются вздутия. По мере утолщения ствола такие вздутия, самостоятельно разрастаясь, образуют желваки: их прокалывают и выдавливают живицу в переносные приемники. Пихтовая живица (бальзам) имеет близкий к стеклу коэффициент преломления, дает совершенно прозрачную пленку и применяется в оптической промышленности, микроскопии и т. д.

Живицу можно рассматривать как раствор твердых смоляных кислот в жидком терпентинном масле. При переработке живицы на канифольно-терпентинных заводах происходит отгонка с водяным паром летучей части – скипидара и уваривание канифоли.

Скипидар и канифоль можно получать путем экстракционной переработки спелого пнёвого осмола (ОСТ 13–131–82), ядровой части сосновых пней с повышенным относительным содержанием смолы за счет отгнивания, в течение 8–15 лет и более, малосмолистой заболони. В некоторых случаях целесообразно использование свежего пнёвого осмола, заготавливаемого одновременно с рубкой деревьев или через 1–2 года. В качестве сырья применяют также и ствольной осмол – древесину стволов сосновых деревьев, сильно просмоленную в результате проведения особого вида подсоски.

В качестве растворителя при извлечении смолистых веществ используют чаще всего бензин. Полученный экстракт подвергают разгонке. Растворитель и скипидар отгоняют, а канифоль остается. Экстракционные продукты уступают по качеству скипидару и канифоли, полученным из живицы. Из экстракционного скипидара получают сосновое флотационное масло для обогащения руд.

Скипидар находит широкое применение как растворитель в лакокрасочной промышленности, для производства камфары, душистых и биологически активных веществ. Камфара используется в медицине, в производстве целлулоида, лаков и кинопленки.

Живичная, экстракционная и талловая канифоль – ценнейший лесохимический продукт. Канифоль потребляет промышленность синтетического каучука, она идет для проклейки бумаги. Глицериновый эфир канифоли вводят в состав нитролаков. Канифоль используется для изготовления электроизоляционных материалов, в мыловаренной, полиграфической, шинной и других отраслях промышленности.

Дубильные вещества можно получать из коры ивы (8–12 % таннинов), ели (7–12 %), лиственницы (10–15 %), пихты (7–15 %) и некоторых других пород, а также из древесины дуба и каштана, которые соответственно содержат около 5 и 7 % таннинов. Промышленность для производства дубителей использует лиственничное, еловое и ивовое корье, заготавливаемое согласно ГОСТ 6663–74, а также древесное сырье из дуба и каштана (ГОСТ 4106–74). Дубильные вещества экстрагируют горячей водой. Товарными продуктами являются жидкие, тестовидные или твердые порошкообразные дубильные экстракты.

**Использование древесной зелени и коры.** Древесная зелень включает в себя листья (хвою), регламентированное количество примесей – коры, древесины, а также неодревесневших побегов, почек, семян и т. д. Согласно ГОСТ 21769–76 хвойная древесная зелень представляет собой тонкие ветви (диаметром до 8 мм) с хвоей, заготавливаемые от свежесрубленной древесины. Лиственная древесная зелень используется пока мало.

В живых клетках, особенно в листьях (хвое), содержится много биологически активных веществ: витаминов, хлорофилла, каротина, ферментов, микроэлементов и др. В хвое в 6 раз больше аскорбиновой кислоты (витамина С), чем в лимонах и апельсинах. Эти вещества необходимы не только растениям, но человеку и животным. Поэтому в качестве добавки в рацион питания животных используют веточный корм, хвойную витаминную муку (ГОСТ 13797-78).

Благодаря работам Ф.Т. Солодкого, А.И. Калниньша и других исследователей, продолжающимся в С.-Петербургской лесотехнической академии [79], создан ряд ценных препаратов. Известна хвойная хлорофиллокаротиновая паста, применяемая для лечения ожогов, кожных заболеваний и других целей. Из бензинового экстракта древесной зелени получают провитаминный концентрат с большим содержанием витамина Е; хлорофиллин натрия, близкий по строению к гемоглобину крови.

Продукты из древесной зелени используются в парфюмерно-косметической промышленности; выпускаются средства для отпугивания и уничтожения насекомых, борьбы с грибами и вирусами, лечебные экстракты.

ММА им. Сеченова, ВИЛАР и СО РАН разработали препарат «Диквертин», рекомендуемый в виде пищевых добавок при воспалительных за-

болеваниях. Он также используется в качестве антиокислителя, увеличивающего срок хранения продуктов.

В древесной зелени содержатся также эфирные масла – легко летучие ароматические вещества. Наибольшее количество эфирных масел (2,5 %) содержится в пихтовой лапке; в сосновой и еловой лапке их в 5–7 раз меньше. Эфирные масла получают из древесной зелени путем отгонки их с паром и последующей конденсации. Широко известно пихтовое эфирное масло (ГОСТ 11699–80), используемое для синтеза камфары, в производстве парфюмерии и косметики, мыловарении и др.

Из тяжелой фракции соснового и елового эфирного масла (побочного продукта при производстве хлорофилло-каротиновой пасты) получают пинабин – эффективное средство для лечения почечно-каменной болезни.

Путем прессования листовенной и хвойной древесной зелени получают богатый витаминами и микроэлементами натуральный сок, который можно использовать в сельском хозяйстве, парфюмерии, медицине и пищевой промышленности (при изготовлении безалкогольных напитков, мармелада).

Кора, как уже отмечалось, используется для получения экстрактивных веществ, грубых кормов, кормовых полуфабрикатов (из осины). Путем компостирования с добавкой аммонийных и фосфорсодержащих солей кору можно превратить в ценное удобрение. Кору используют для получения строительных (главным образом теплоизоляционных) плит, а при невозможности переработки – в виде топлива.

## ГЛАВА 4. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ

### § 10. Внешний вид древесины

**Цвет.** Древесина поглощает падающее световое излучение избирательно. От спектрального состава отраженного ею светового потока зависит возникающее зрительное ощущение, называемое цветом.

Обычно для характеристики цвета древесины используют словесные описания, в основе которых лежат определенные зрительные образы или символические понятия. Однако это свойство древесины можно объективно охарактеризовать с помощью методов, которыми располагает колориметрия (от латинского "ко́лор" – цвет) – наука о цветовых измерениях. Для этого необходимо установить численные значения трех показателей – цветового тона  $\lambda$ , чистоты  $P$  и светлоты  $p$ .

Цветовой тон определяется длиной волны  $\lambda$  чистого спектрального цвета. Обычно цвета окружающих нас объектов более или менее

блеклые, так как чистые спектральные цвета разбавлены белым. Чистота цвета  $P$ , которая характеризует степень этого разбавления может изменяться от 100 % до нуля. Светлота определяется коэффициентом отражения  $\rho$ . Для белых поверхностей, отражающих максимальное количество световой энергии, коэффициент отражения близок к единице, для черных приближается к нулю.

Характеристики цвета древесины можно установить, используя фотоэлектрические колориметры или атлас цветов, представляющий собой альбом с большим количеством накрасок. Каждой накраске соответствует определенный номер, по которому в таблице справочника, приложенного к атласу, находят значения  $\lambda$ ,  $P$  и  $\rho$ .

С помощью такого атласа автором были определены цветовые характеристики пород из коллекции МЛТИ. Было показано, что выдержанная в течение 5–20 лет древесина большинства отечественных пород весьма мало отличается по цветовому тону. Длина волны  $\lambda$  колеблется в пределах 578–585 нм\*, что соответствует желтому участку спектра. Вместе с тем наблюдается большое разнообразие значений чистоты цвета  $P$ , которые изменяются в пределах 30–60 %. Светлота  $\rho$  изменяется в еще больших пределах (20–70 %). Данные, характеризующие цвет некоторых из исследованных пород, приведены в табл. 9

9. Цветовые характеристики древесины некоторых пород

Порода	Цветовой тон	Чистота	Светлота
	$\lambda$ , нм	$P$ , %	$\rho$ , %
Лиственница – ядро	583,5	54,0	32,5
Тис – ядро	585,5	55,8	25,1
– заболонь	579,2	45,6	53,5
Сосна – ядро	581,1	51,6	49,0
– заболонь	579,0	47,0	58,6
Ель	580,0	44,0	54,4
Кедр – ядро	583,0	46,5	39,5
Пихта	579,6	40,1	57,3
Дуб – ядро	581,5	53,1	29,9
Ильм – ядро	582,0	44,3	34,7
Клен	582,0	41,7	41,7
Береза	582,9	42,2	41,6
Бук	582,7	41,6	35,0
Осина	578,2	38,6	68,7

Основное вещество, из которого состоит древесина, – целлюлоза почти белого цвета. Все многообразие цветовых оттенков древесины придают ей вещества, заключенные в полостях клеток или пропитывающие их стенки, – красящие и дубильные, смолы и продукты их окисления.

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

Древесина пород умеренного пояса окрашена бледно, а – тропического пояса очень ярко. Интенсивность окраски увеличивается с возрастом, особенно у ядровых пород; в оптимальных условиях роста окраска бывает более яркой.

Древесина многих пород изменяет цвет при выдержке под влиянием воздуха и света. Тем не менее цвет многих пород настолько характерен, что может служить одним из признаков при их распознавании. Изменение цвета древесины чаще всего указывает на поражение ее грибами.

В речной воде древесина дуба сильно темнеет в результате соединения дубильных веществ с солями железа. Этой же причиной объясняется и появление на поверхности дубовых пиломатериалов черных полос и пятен при распиловке сырой древесины. Заболонь сосны после сплава иногда приобретает желтую окраску, а древесина березы – оранжевую. При пропаривании древесины бука она довольно равномерно окрашивается в красноватый цвет. После высокотемпературной сушки у древесины хвойных пород появляется буроватая окраска.

Цвет – одна из важнейших характеристик внешнего вида древесины, которую учитывают при выборе пород для внутренней отделки помещений, изготовления мебели, музыкальных инструментов, художественных поделок, спортивного инвентаря и т. д.

**Блеск.** Под блеском древесины понимают ее способность направленно отражать световой поток. Наибольший блеск наблюдается при освещении зеркальных, т. е. гладких поверхностей с размерами неровностей, меньшими половины длины световой волны. В отличие от них матовые поверхности, имеющие однородные неровности больших размеров, отражают световой поток диффузно, т. е. равномерно во все стороны. Поверхности даже самым тщательным образом обработанной древесины приближаются к матовым и могут характеризоваться коэффициентом диффузного отражения (белизной).

Если на продольных разрезах древесины встречаются участки со сравнительно небольшими структурными неровностями, появляются блики, отсветы. Такой способностью обладают сердцевинные лучи на радиальных разрезах (лучше расколах) древесины клена, платана, бука, ильма, дуба, кизила, белой акации, айланта; шелковистый блеск свойственен древесине бархатного дерева. Из иноземных пород особенно заметным блеском отличается древесина сатинового дерева и махагоны (красное дерево).

Исследования, проведенные ранее автором и позднее Б.М. Рыбиным (МЛТИ) с помощью блескомера ФБ-2, показывают, что при использованном способе измерения степень блеска зависит от колориметрических характеристик древесины и ее белизны. Чем больше белизна, тем выше измеряемые показатели блеска. Эти показатели возрастают с увеличением угла падения (и отражения) светового потока.

Пока еще не удастся дать полную количественную характеристику блеска древесины, точно соответствующую нашим зрительным восприятиям.

**Текстура.** Текстурой\* называют рисунок, образующийся на поверхности древесины вследствие перерезания анатомических элементов. Чем сложнее строение древесины и разнообразнее сочетание отдельных элементов, тем богаче ее текстура. В строении древесины хвойных пород принимает участие сравнительно мало типов упорядоченно расположенных анатомических элементов, создающих довольно однообразную текстуру.

У хвойных пород текстура зависит в основном от разницы в окраске ранней и поздней древесины, а также от ширины годичных слоев. Извилистые очертания годичных слоев образуют более интересный рисунок, особенно у лиственницы (рис. 22, а) и тиса на тангенциальном разрезе.

Для древесины лиственных пород с более сложным строением характерно наличие видимых невооруженным глазом крупных сосудов (например, ясень, бархатное дерево, дуб), сердцевинных лучей, обычно окрашенных темнее, чем окружающая древесина (например, бук, ильм, платан), неправильно расположенных волокон и т. д. Это создает более богатую текстуру.

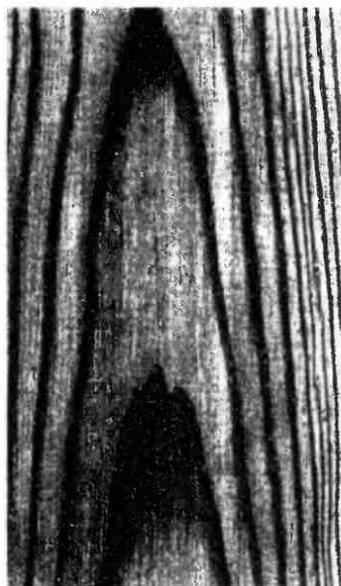
Выбор направления разреза древесины определяет характер текстуры. Из наших лиственных пород на радиальном разрезе красивую текстуру, обусловленную наличием сердцевинных лучей имеют: бук, платан, клен, явор, дуб, ильм, карагач (рис. 22, б). Три последние кольцесосудистые породы ценятся своей текстурой и на тангенциальном разрезе.

Кроме этих пород на тангенциальном разрезе красивую текстуру, образованную в основном перерезанными сосудами, имеют: ясень, грецкий орех, бархатное дерево, каштан съедобный, вяз.

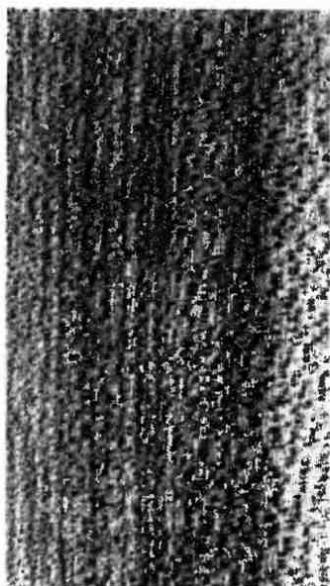
Путаное расположение волокон (свилеватость) создает отличающуюся высокими декоративными свойствами текстуру древесины капов — наростов на стволах деревьев лиственных пород. Так называемая узорчатая древесина наблюдается у карельской берёзы (рис. 22, в). Очень ценится текстура "птичий глаз", представляющая собой аномальную древесину белого клена. Выразительна волнистая текстура ясеня маньчжурского (рис. 22, г). Своеобразную текстуру можно получить при неравномерном прессовании древесины, лущении ее ножом с волнистым лезвием, а также при лущении древесины под углом к направлению волокон. Текстура, также как и цвет, определяет ценность древесины как декоративного материала. Прозрачная отделка древесины лаками проявляет ее текстуру. Лаковое покрытие, имеющее близкий к древесине коэффициент преломления света, увеличивает прозрачность поверхностных слоев и способствует зрительному восприятию глубины текстуры.

---

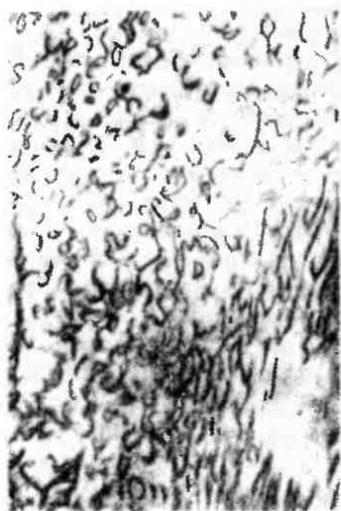
\* Не следует смешивать с английским термином "texture", который используется для обозначения фактуры древесины: анатомических неровностей, мелко- и крупно-слоистости.



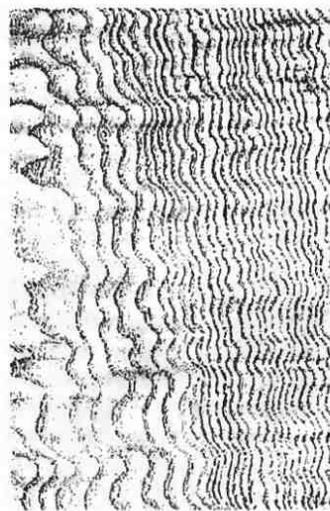
а



б



в



г

Рис. 22. Текстура древесины:

а – лиственницы (тангенциальный разрез); б – ильма (радиальный разрез); в – карельской березы; г – ясеня маньчжурского (волнистая)

**Макроструктура.** Для оценки качества древесины по внешнему виду используют некоторые характеристики макроструктуры: ширину годовичных слоев, степень равнослойности, содержание поздней древесины в годовичных слоях, равноплотность, а также величину и характер распределения анатомических неровностей.

Показателем годовичного прироста, характеризующим среднюю ширину годовичных слоев, служит число слоев, приходящееся на 1 см отрезка, отмеренного по радиальному направлению на торцевой поверхности образца. Степень равнослойности обычно оценивают по разнице в числе годовичных слоев на двух таких соседних участках длиной по 1 см. Содержание поздней древесины определяется соотношением в процентах между суммарной шириной зон поздней древесины и общей протяженностью (в радиальном направлении) участка измерения, включающего целое число слоев.

Согласно ГОСТ 16483.18–72 на торце образца проводят карандашом линию в радиальном направлении, отмечают границы крайних целых годовичных слоев на участке примерно в 2 см и подсчитывают число слоев  $N$ . Расстояние  $l$  между отметками измеряют масштабной линейкой с погрешностью не более 0,5 мм. Число годовичных слоев в 1 см вычисляют с погрешностью до половины слоя по формуле

$$n = \frac{N}{l}. \quad (2)$$

Затем в каждом годовичном слое между отметками измеряют ширину поздней зоны  $\delta$  измерительной лупой с погрешностью не более 0,1 мм; полученные величины складывают и процент поздней древесины подсчитывают с погрешностью до 1 % по формуле

$$m = \frac{100 \sum \delta}{l}, \quad (3)$$

где  $\sum \delta$  – общая ширина поздних зон;  $l$  – общее протяжение тех годовичных слоев, в которых измерялась ширина поздней зоны.

Существуют различные автоматизированные приборы для измерения этих показателей. В отечественной практике находит применение микродендрометр, разработанный в МарГТУ.

Как указывалось ранее, ширина годовичных слоев и содержание поздней древесины у разных пород различны, они изменяются по высоте и радиусу ствола, зависят от условий произрастания. В табл. 10 приведены ориентировочные характеристики макроструктуры древесины для некоторых наших пород [26, 10].

Равноплотность древесины характеризуется равномерностью распределения механических тканей по ширине годичного слоя. Малой равноплотностью обладает древесина пород с резкой разницей в строении ранней и поздней зон годичных слоев – лиственница, сосна, дуб, ясень и др. Высокой равноплотностью отличаются самшит, груша, граб, клен, бук, ольха, осина, липа и ряд других пород.

Поверхности древесины, как бы тщательно они не обрабатывались режущими инструментами, всегда будут иметь те или иные неровности, образованные перерезанием полых анатомических элементов.

#### 10. Ширина годичных слоев и содержание поздней древесины у некоторых пород

Порода	Район произрастания	Число годичных слоев в 1 см	Процент поздней древесины
Лиственница сибирская	Западная Сибирь	5,5	34
	Восточная Сибирь	13,5	29
Сосна обыкновенная	Север европейской части	11,8	26
	Западная Сибирь	6,9	29
Ель обыкновенная	Восточная Сибирь	11,2	27
	Север европейской части	12,1	21
Ель сибирская	Западная Сибирь	6,5	25
	Восточная Сибирь	9	25
Дуб черешчатый	Центральные районы европейской части	5,5	65
Береза повислая и пушистая	Центральные районы европейской части	5,5	–
	Центральные районы европейской части	5,4	–

Поверхность продольных разрезов древесины таких часто используемых для отделки пород, как дуб, ясень, орех, ильм, по данным Б.М. Буглая и Н.М. Бессоновой имеет анатомические неровности и высотой до 200 мкм и более. У хвойных пород неровности имеют высоту 8–60 мкм, а у большинства рассеяннососудистых лиственных пород 30–100 мкм.

#### § 11. Влажность древесины и коры; свойства, связанные с ее изменением

**Вода в древесине.** В растущем дереве древесина содержит значительное количество воды, необходимой для его жизнедеятельности. В срубленной древесине в зависимости от условий хранения и транспортировки содержание воды может увеличиваться или уменьшаться. При использовании древесины в большинстве случаев воду из нее удаляют с целью улучшения качества материалов и готовых изделий.

Для количественной характеристики содержания воды в древесине используют показатель – влажность. Под влажностью (абсолютной)\* понимают выраженное в процентах отношение массы воды к массе сухой древесины:

$$W = \frac{100(m - m_0)}{m_0}, \quad (4)$$

где  $m$  – масса образца влажной древесины, г;  $m_0$  – масса образца абс. сух. древесины, г.

Влажность древесины измеряют прямыми и косвенными методами. Прямые методы основаны на выделении тем или иным способом воды из древесины. Воду можно отделить путем высушивания и определить влажность с заданной степенью точности. Согласно ГОСТ 16483.7–71 с погрешностью до 0,1 % можно определить влажность проб из образцов, подвергавшихся физико-механическим испытаниям.

Очищенные от заусенцев и опилок пробы помещают в стеклянные бюксы с притертыми крышками и взвешивают на аналитических весах с погрешностью до 0,001 г. Бюксы используют для того, чтобы масса пробы не изменилась во время взвешивания. Массу бюксы определяют заранее на тех же весах. Пробы находятся в бюксах (но со снятыми крышками) и во время высушивания.

Пробы высушивают в сушильных шкафах – небольших камерах, чаще всего с электрическим нагревом и автоматическими регуляторами температуры. Бюксы с пробами находятся в шкафу при температуре воздуха  $103 \pm 2$  °С до тех пор, пока не будет достигнуто постоянное значение массы, устанавливаемое контрольными взвешиваниями. Первое взвешивание проводят через 6–10 ч., а далее через каждые 2 ч. Если разница в массе при двух взвешиваниях с указанным интервалом окажется менее 0,002 г, считают, что достигнуто абсолютно сухое состояние древесины. Пробы из смолистой древесины хвойных пород не должны находиться в сушильном шкафу более 20 ч.

Перед каждым взвешиванием бюксы закрывают крышками и охлаждают в сухом воздухе в эксикаторах – сосудах с безводным хлористым кальцием или серной кислотой концентрацией 94 %. Влажность, %, вычисляют по формуле

---

\* Иногда, например, при определении содержания воды в дровах, используют показатель "относительная влажность"  $W_{\text{отн}} = \frac{100(m - m_0)}{m}$ .

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} 100, \quad (5)$$

где  $m_1$  – масса бюксы, г;  $m_2$  – масса бюксы с пробой до высушивания, г;  $m_3$  – масса бюксы с пробой после высушивания, г.

Влажность древесины с большей погрешностью (до 1 %) определяют по образцам размерами 20×20×30 мм, взвешивая их без бюкса на технических весах с погрешностью до 0,01 г. После первого взвешивания образцы помещают в сушильный шкаф, в котором они находятся до тех пор, пока по результатам двух последних контрольных взвешиваний (разница должна быть не более 0,02 г) не будет установлено достижение постоянной массы  $m_0$ . Влажность образца вычисляют по формуле (4). Описанный простой и надежный метод определения влажности путем высушивания нашел широкое применение.

Значительно реже применительно к древесине используют другой прямой метод, основанный на отгонке влаги с парами толуола (метод дистилляции). По этому методу сначала определяют на весах массу образца влажной древесины. Затем его нагревают с толуолом; образующиеся при этом пары конденсируются, благодаря разной плотности жидкостей вода легко отделяется от толуола, и можно измерить ее объем (массу). Зная массу влажной древесины и массу содержащейся в ней воды, можно определить влажность древесины в процентах.

Основной недостаток прямых методов заключается в том, что продолжительность процедуры очень велика. При методе высушивания она занимает 8–10 ч, а иногда и более. Этому недостатка лишены косвенные методы. Они основаны на измерении показателей других физических свойств древесины, которые зависят от содержания воды в древесине.

Для создания влагомеров широко используются зависимости между влажностью и электрическими параметрами древесины. Наибольшее распространение получили кондуктометрические электровлагомеры, основанные на измерении электропроводности древесины. В таких приборах контакт с древесиной осуществляется при помощи датчика с тремя игольчатыми электродами. Иголки датчика вводят через боковую (не торцовую) поверхность в древесину. Влажность определяют обычно на глубине 10 мм.

В современных конструкциях электровлагомеров вводятся данные о породе и температуре воздуха. На лицевой панели прибора высвечиваются показания влажности древесины в процентах. Абсолютная погрешность измерения влажности древесины в области ниже 30 % составляет  $\pm 1,5$  %, а в области более 30 % погрешность значительно выше.

К недостаткам этих приборов помимо меньшей точности (по сравнению с методом высушивания) относится также и то, что они дают значения

локальной влажности древесины в месте введения игольчатых контактов. При обычно неравномерном распределении влажности по объему доски или заготовки этот недостаток может быть причиной дополнительных погрешностей в определении интегральной влажности древесины.

Известны также емкостные электровлагомеры, при помощи которых по емкости конденсатора с диэлектриком из древесины определяют зависящую от влажности диэлектрическую проницаемость древесины.

Разработаны конструкции индуктивных электровлагомеров, позволяющих определять влажность калиброванных образцов древесины бесконтактным способом. Эти приборы основаны на измерении индуктивности, или добротности контура катушки самоиндукции с сердечником из влажной древесины.

Используют также радиочастотные влагомеры, которые измеряют диэлектрические потери, зависящие от влажности древесины, и др.

Имеются предложения измерять влажность по проницаемости древесины для рентгеновского, бета- и гамма-излучения и другими, в том числе и комбинированными способами.

Влажность в растущем дереве распределена неравномерно как по радиусу, так и по высоте ствола. У хвойных пород влажность заболони в 3-4 раза выше влажности ядра и спелой древесины. Так, у сосны и ели Ленинградской области среднегодовая влажность заболони оказалась 112 и 122 %, влажность ядра и спелой древесины – 33 и 38 %.

В пределах ядра (спелой древесины) влажность у сосны, ели и лиственницы из Восточной Сибири распределена равномерно. В то же время у пихты, по данным В.П. Маркарянца и Л.Н. Исаевой, влажность центральной зоны спелой древесины намного выше, чем периферической. Аналогичное явление наблюдается у кедра.

У лиственных пород как ядровых (дуб, ясень, вяз, ильм), так и безъядровых (береза, осина, липа) распределение влажности по сечению ствола более или менее равномерно. При этом влажность ядровой древесины у некоторых лиственных пород (дуб, вяз и др.) может быть значительно выше, чем у хвойных, достигая 70–80 %, а иногда и более.

Влажность коры в свежесрубленном состоянии, по данным ЦНИИ-МЭ, в среднем составила: для сосны 120 %, ели 112 %, березы 58 %. У поступающего на предприятия сырья кора имеет меньшую влажность, порядка 60–80 %. Однако при этом влажность наружного слоя – корки для ели и сосны составляет 21 и 27 %, а для березы 7 %; влажность луба у хвойных пород в 7 раз, а у березы в 10 раз больше. Сплавное сырье имеет кору влажностью в 3–4 раза большей, чем у сырья сухопутной доставки.

По высоте ствола влажность заболони в хвойных породах увеличивается в направлении от комля к вершине, а влажность ядра остается практически без изменения. В стволах ядровых лиственных пород (дуб, ясень,

вяз) влажность ядра вверх по стволу слегка понижается, а влажность заболони почти не изменяется, у лиственных безъядровых пород (осина, липа) влажность увеличивается от комля к вершине. Влажность коры у сосны в нижней части ствола на 60–75 % меньше, чем в средней и вершинной. У ели и березы влажность коры по высоте ствола примерно одинакова.

Поскольку древесина молодых деревьев почти полностью состоит из заболони, она больше подвержена сезонным колебаниям. Данные об изменении влажности древесины сосны, ели, березы и осины, произрастающих в Ленинградской области, свидетельствуют о том, что наибольшая влажность в дереве наблюдается зимой (ноябрь–февраль), а наименьшая – летом (июль–август). Влажность заболони летом может быть на 25–50 % ниже, чем зимой, а влажность ядра (спелой древесины) в течение года почти не изменяется.

Кроме сезонных изменений влажность древесины в стволах растущих деревьев подвержена и суточным колебаниям. Так, в заболони ели утром наблюдалась влажность 186 %, в полдень 132, вечером 150 %, в заболони дуба утром (в августе) 68 %, в полдень 72, вечером 66, ночью 71 %.

Различают две формы воды, содержащейся в древесине, – связанную (или гигроскопическую) и свободную. Связанная (адсорбционная и микрокапиллярная) вода находится в клеточных стенках, а свободная содержится в полостях клеток и в межклеточных пространствах. Связанная вода прочно удерживается в основном физико-химическими связями; удаление этой воды, особенно ее адсорбционной фракции, затруднено и существенно отражается на большинстве свойств древесины. Свободная вода, удерживаемая силами капиллярного взаимодействия, удаляется значительно легче и оказывает меньшее влияние на свойства древесины. Принято называть древесину влажной, если она содержит только связанную воду, или сухой, если она содержит кроме связанной и свободную воду.

Максимальное количество связанной воды в клеточных стенках соответствует пределу их насыщения или пределу гигроскопичности. Раньше в древесиноведческой литературе эти понятия отождествляли. Однако, как показали исследования, проведенные П.С. Серговским и Я.Н. Станко (МЛТИ) между ними есть существенная разница.

Нами были предложены следующие определения указанным терминам.

Предел насыщения клеточных стенок  $W_{п.н}$  – это максимальная влажность клеточных стенок, достигаемая при увлажнении древесины в воде. Прямое экспериментальное определение  $W_{п.н}$  затруднительно, поскольку после увлажнения древесины в воде или в растущем дереве при полном насыщении клеточных стенок связанной водой в полостях клеток и в межклеточных пространствах находится свободная вода. Однако этот показатель можно определить, %, по формуле

$$W_{п.н} = \left( \frac{1}{\rho_б} - \frac{1}{\rho_о} \right) \rho_в \cdot 100, \quad (6)$$

где  $\rho_б$  и  $\rho_о$  – соответственно базисная плотность древесины и плотность абс. сух. древесины, г/см<sup>3</sup>;  
 $\rho_в$  – плотность связанной воды, г/см<sup>3</sup>.

Расчеты, выполненные автором по этой формуле на основе экспериментально полученной в МЛТИ (В.П. Галкин и Э.Б. Щедрина) степенной зависимости между разбуханием и плотностью древесины (эта зависимость необходима для определения  $\rho_б$ ), показали существенное влияние плотности на  $W_{п.н}$ . Зависимость  $W_{п.н} = f(\rho_б)$  – гиперболического вида; с увеличением плотности  $W_{п.н}$  снижается. Об этом свидетельствуют и данные зарубежных исследователей [по 91]. Указанное явление можно объяснить тем, что с увеличением плотности древесины уменьшается площадь поверхности клеточных стенок, в углублениях которых удерживается микрокапиллярная вода. Это приводит к уменьшению количества связанной воды и, следовательно, к снижению  $W_{п.н}$ .

Если использовать данные о плотности древесины  $\rho_б$  и  $\rho_о$  наших пород, приведенные в табл. 19, то вычисленная по формуле 6 величина  $W_{п.н}$  изменяется от 24 % (граб) до 38 % (пихта). Расчеты Т.В. Галкиной по исходным литературным данным для 117 пород с плотностью  $\rho_о$  от 1100 до 100 кг/м<sup>3</sup> показали, что  $W_{п.н}$  изменяется от 22 до 53 %.

Следовательно явно не подтверждается предположение Б.С. Чудинова [32], что указанная формула якобы дает значения  $W_{п.н}$ , которые не зависят от плотности  $\rho_о$ . Предложенная формула нашла признание других исследователей [89].

При расчетах обычно используют среднюю величину  $W_{п.н} = 30\%$ . Такая величина может быть принята для древесины пород, произрастающих в умеренном климатическом поясе. Однако для отдельных пород (особенно с малоплотной древесиной) отклонения от этой величины могут достигать 10–15 % влажности и даже более. Точные значения  $W_{п.н}$  для древесины каждой из отечественных пород предстоит еще определить.

Предел гигроскопичности  $W_{п.г}$  – это максимальная влажность клеточных стенок, достигаемая при сорбции паров воды из воздуха; характеризуется отсутствием воды в полостях клеток и равновесием влажности клеточных стенок с воздухом, приближающимся к насыщенному состоянию. Этот показатель может быть определен прямым экспериментом.

Если очень долго выдерживать древесину в насыщенном воздухе при относительной влажности  $\phi=1$ , то, как было показано в работах

А. Стамма, Б.С. Чудинова [75], Г.С. Шубина [76], заполняются водой не только стенки, но и полости клеток.

Поэтому для определения предела гигроскопичности может быть использован метод, разработанный ЦНИИМОДом (ГОСТ 16483.32–77), но с выдержкой образцов в виде набора стружек не над чистой водой, а над растворами, понижающими  $\phi$  до 0,995.

В то время как на величину предела насыщения клеточных стенок  $W_{п.н}$  изменение температуры практически не оказывает влияния, предел гигроскопичности  $W_{п.г}$  с повышением температуры заметно снижается и, например, при 100 °С составляет 19–20 %. При отрицательных температурах  $W_{п.г}$  также уменьшается и при –22 °С, по данным разных авторов [75, 76], составляет 17–21 %. Предел гигроскопичности, как и предел насыщения клеточных стенок, увеличивается с уменьшением плотности древесины. У пород с менее плотной древесиной значительно увеличивается поверхность клеточных стенок с микроуглублениями, в которых происходит конденсация влаги из воздуха [75]. Хотя эти углубления лишь условно можно считать капиллярами, воду, образующуюся на поверхности, выступающей полости клеток, при сорбции можно назвать капиллярно-конденсационной.

По нашим расчетам количество капиллярно-конденсационной воды при увлажнении в воздухе несколько меньше количества микрокапиллярной воды при увлажнении путем выдерживания в воде. Можно принять, что при комнатной температуре предел насыщения клеточных стенок практически равен пределу гигроскопичности.

При выдерживании древесины в воздухе определенного состояния ее влажность становится устойчивой. Состояние воздуха характеризуется температурой  $t$  и относительной влажностью (степенью насыщенности влагой)  $\phi$ , которая может изменяться от 0 до 100 %. Величина устойчивой влажности древесины, длительно выдержанной при определенных значениях  $t$  и  $\phi$  практически одинакова для всех пород. При поглощении влаги (сорбции) она меньше, чем при удалении влаги (десорбции). Эту разницу между устойчивыми влажностями принято называть гистерезисом сорбции. Следует иметь в виду, что при сорбции и десорбции происходит изменение содержания связанной влаги. Измельченная древесина (опилки, стружки) с большой удельной поверхностью имеет очень малый гистерезис сорбции и ее устойчивую влажность называют равновесной  $W_p$ . У сортиментов из древесины толщиной более 15 мм и шириной более 100 мм гистерезис сорбции составляет около 2,5 % [54]. Таким образом, равновесная влажность досок и других крупных сортиментов меньше устойчивой влажности десорбции, но больше устойчивой влажности сорбции примерно на 1,3 %.

Связи между равновесной влажностью древесины и состоянием воздуха отражает диаграмма на рис. 23. При данной температуре и относи-

тельной влажности (степени насыщенности) воздуха  $\phi$  равновесную влажность по диаграмме находят следующим образом. Допустим, например, что  $t = 20^\circ\text{C}$ , а  $\phi = 60\%$ ; соответствующие вертикальная и горизонтальная прямые пересекаются в точке, которая оказывается расположенной между двумя наклонными кривыми  $W_p = 11\%$  и  $W_p = 12\%$ . Интерполируя получают искомую равновесную влажность древесины  $11,2\%$ .

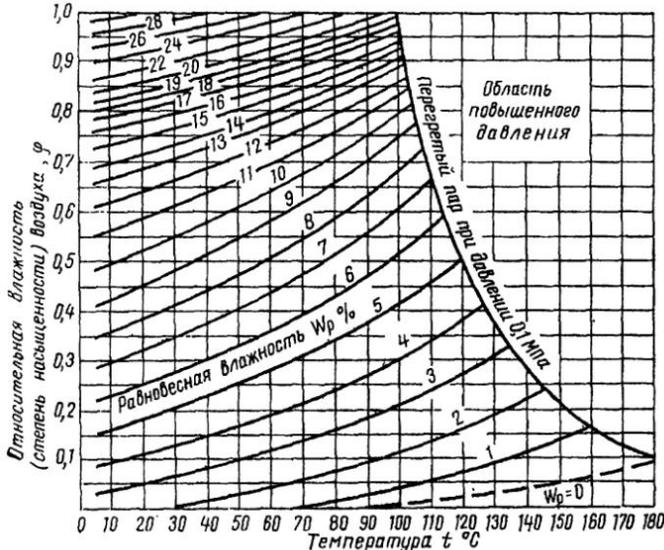


Рис. 23. Диаграмма равновесной влажности древесины (по П.С. Серговскому)

При повышенном давлении (в среде перегретого пара), так же как при атмосферном давлении, равновесная влажность древесины, выдержанной при постоянной относительной упругости пара  $\phi$ , будет тем ниже, чем выше температура среды. Некоторые значения равновесной влажности древесины в среде перегретого пара [по 76] приведены в табл. 11.

11. Равновесная влажность древесины, %, в среде перегретого пара при повышенном давлении

Давление, МПа	Температура, °С					
	115	120	130	140	150	160
0,15	9,5 (0,85)	7,4 (0,73)	4,9 (0,55)	3,5 (0,40)	2,4 (0,31)	1,5 (0,23)
0,20	—	13,8 (1,0)	6,7 (0,72)	4,6 (0,55)	3,1 (0,41)	2,1 (0,31)
0,30	—	—	—	7,1 (0,82)	4,6 (0,61)	3,4 (0,48)

Примечание. В скобках указаны значения степени насыщенности пара  $\phi$ .

При испытаниях с целью определения показателей физико-механических свойств древесины ее кондиционируют, приводя к нормализованной влажности. Это равновесная влажность древесины, соответствующая  $t = 20 \pm 2^\circ \text{C}$  и  $\phi = 65 \pm 5\%$  и в среднем равна 12 %.

В практике различают пять степеней влажности древесины (см. табл. 12)

12. Степени влажностного состояния древесины

Состояние древесины	Условия достижения	Влажность, $W, \%$
Мокрая древесина	Длительное нахождение в воде	> 100
Свежая (свежесрубленная) древесина	Сохранение влажности растущего дерева	50–100
Древесина атмосферной сушки (воздушно-сухая)	Сушка или выдержка на открытом воздухе	15–20
Древесина камерной сушки (комнатно-сухая)	Сушка в камерах или выдержка в отапливаемом помещении	8–12
Абсолютно сухая древесина	Сушка при $t = 103 \pm 2^\circ \text{C}$	0

**Высыхание древесины.** Влажность древесины, находящейся на открытом воздухе или в помещении, постепенно уменьшается. При этом происходят одновременно два процесса: испарение воды в окружающую среду и перемещение воды изнутри к поверхности. Поскольку испарение воды с поверхности древесины происходит быстрее, чем ее продвижение по древесине, внутренняя зона сортимента (доски, бруса, бревна) имеет большую влажность, чем периферические зоны. Распределение влажности по толщине, ширине или длине сортимента характеризуется градиентом влажности, т. е. тангенсом угла наклона касательной к кривой влажности.

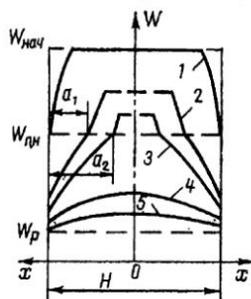
При влажности ниже предела насыщения клеточных стенок  $W_{п.н.}$ , когда в древесине содержится только связанная вода, скорость ее передвижения пропорциональна градиенту влажности и коэффициенту влагопроводности. Влагопроводность определяет способность древесины проводить связанную воду. Вода перемещается в древесине по системе макрокапилляров, заполненных воздухом (полости клеток, межклеточные пространства), и по системе микрокапилляров в клеточных стенках. По макрокапиллярам влага перемещается в виде пара, а по микрокапиллярам – преимущественно в виде жидкости.

При влажности выше  $W_{п.н.}$ , когда в древесине присутствуют не только связанная, но и свободная вода, градиент влажности, как показал П.С. Серговский, не определяет скорости передвижения воды. Если древесина содержит свободную воду по всему объему сортимента, в ней возможно лишь передвижение свободной воды в виде жидкости под действи-

ем внешних сил (например, разности гидростатического или избыточного давления). В этом случае передвижение свободной воды будет определяться водопроводностью (или капиллярной проницаемостью древесины).

Рис. 24. Распределение влажности по толщине сортамента на разных этапах высушивания ( по П.С. Сергоровскому):

$H$  – толщина доски;  $W_{нач}$ ,  $W_{п.н.}$ ,  $W_p$  – соответственно начальная влажность, предел насыщения клеточных стенок, равновесная влажность;  $a_1$ ,  $a_2$  – зоны влагопроводности



В процессе высушивания влажность у поверхностных слоев вследствие испарения свободной воды быстро доходит до предела насыщения клеточных стенок (рис. 24 кривая 1). Здесь радиус заполненных водой капилляров (в клеточных стенках) оказывается меньше, чем радиус макрокапилляров (полостей клеток) во внутренних слоях. Возникает разность капиллярных давлений и свободная вода, по мере ее испарения, подсасывается к поверхности. У тонких сортиментов (шпон, тарная дощечка и др.) подвод воды изнутри к поверхности происходит без особых затруднений, и влажность на поверхности в начальный период поддерживается на постоянном уровне, близком к пределу насыщения клеточных стенок. В этот период процесса скорость сушки (уменьшение влажности в единицу времени) постоянна. Когда запасы воды в зонах, сравнительно близко расположенных к поверхности, будут исчерпаны и потребуется подведение воды из более глубоких зон, влажность на поверхности станет ниже  $W_{п.н.}$ . Начиная с этого момента, испарение свободной воды (частично) будет происходить в глубине сортамента и по его толщине образуются две зоны. В наружной зоне влагопроводности ( $a$  на рис. 24) скорость перемещения связанной воды, как уже отмечалось, зависит от градиента влажности, во внутренней капиллярной зоне  $\left(\frac{H}{2} - a\right)$  свободная вода продвигается

под действием сил капиллярного давления. Между зоной влагопроводности и капиллярной зоной находится поверхность испарения свободной воды. Вследствие неоднородности строения древесины поверхность раздела между указанными зонами распространяется на некоторую толщину. Постепенно, из-за все больших затруднений в продвижении воды изнутри толщина зоны влагопроводности увеличивается ( $a_2$  у кривой 3 больше  $a_1$  у кривой 2 на рис. 24), и скорость сушки замедляется. После того как вся свободная вода удалена, кривые распределения влажности имеют вид снижающихся к  $W_p$  парабол (4 и 5 на рис. 24), и скорость сушки продолжает уменьшаться.

При высушении толстых сортиментов (доски, брусья), когда поступление свободной воды к поверхности затруднено, период постоянной скорости сушки практически отсутствует.

Для расчета процессов высухания (и увлажнения) древесины необходимо располагать данными о величине коэффициентов влагопроводности, от которых зависит интенсивность изотермического переноса связанной воды.

По разработанному П.С. Серговским методу коэффициент влагопроводности можно определить экспериментально, если обеспечить постоянный ток воды через образец и знать кривую распределения влажности в направлении тока. Тогда коэффициент влагопроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ , находят по формуле

$$D = \frac{M}{F \rho_0 \left( \frac{du}{dx} \right)}, \quad (7)$$

где  $D$  – коэффициент влагопроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $M$  – скорость тока воды через образец,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $F$  – площадь сечения образца,  $\text{м}^2$ ;  $\rho_0$  – плотность древесины в абсолютно сухом состоянии,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $u$  – влагосодержание древесины, определяемое по формуле  $\frac{(m - m_0)}{m_0}$ ;  $\frac{du}{dx}$  – градиент влажности,  $\text{м}^{-1}$ .

Позднее П.С. Серговский и Р.П. Алпаткина (МЛТИ) определили коэффициент влагопроводности другим методом – по времени увлажнения образца. Эти данные для разной температуры представлены в табл. 13.

13. Коэффициенты влагопроводности древесины некоторых пород при разных температурах

Порода	Зона древесины	Направление тока влаги	Средняя базисная плотность $\rho_b$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Коэффициент влагопроводности $D \cdot 10^{10}$ , $\text{м}^2/\text{с}$ , при температуре, $^{\circ}\text{C}$		
				20	60	80
Лиственница	Ядро	Тангенциальное	482	1,66	4,9	8,1
		Радиальное	482	1,93	5,05	8,6
Ель	Спелая древесина	Тангенциальное	350	2,65	9,05	17,7
		Радиальное	350	2,78	9,20	20,0
	Заболонь	Тангенциальное	350	3,16	12,1	19,0
		Радиальное	350	3,26	13,7	19,6
Осина	Центральная и периферийная зоны	Тангенциальное	388	2,27	8,56	16,2
		Радиальное	388	2,58	9,93	17,4
Береза	— " —	Тангенциальное	500	1,85	6,20	10,0
		Радиальное	500	2,07	6,34	11,4

Коэффициент влагопроводности зависит от плотности древесины. При малой плотности основную роль в передвижении влаги по древесине, вероятно, играет система макрокапилляров, поэтому уменьшение плотности и соответствующее относительное увеличение объема полостей клеток, естественно, вызывают повышение коэффициента влагопроводности. В ядровой и спелой древесине проницаемость пор в стенках клеток значительно меньше, чем в заболони, поскольку и в растущем дереве только заболонь является водопроводящей зоной. Этим объясняется меньшая влагопроводность ядровой (спелой) древесины по сравнению с заболонной при одинаковой плотности.

В радиальном направлении влагопроводность несколько больше, чем в тангенциальном, что связано с влиянием сердцевинных лучей. У пород с широкими лучами (бук, дуб) отношение коэффициентов влагопроводности в указанных направлениях составляет соответственно 1,7 и 1,5, а у сосны с очень узкими лучами – только 1,15. Коэффициент влагопроводности древесины вдоль волокон в 15–20 раз больше, чем в тангенциальном направлении поперек волокон, так как влага перемещается по направлению ее основного тока в растущем дереве.

Влагопроводность значительно увеличивается при повышении температуры, вследствие возрастания коэффициента диффузии пара и снижения вязкости воды.

При отрицательной температуре, как показывают опыты Э.Б. Щединой (МЛТИ), наблюдается такой же характер влияния указанных выше факторов на влагопроводность, как и при положительной температуре. Однако при переходе через точку замерзания воды происходит резкое изменение коэффициентов влагопроводности. При 0 °С для незамерзшей древесины коэффициенты влагопроводности в 3–4 раза больше, чем при той же температуре для замерзшей древесины. Более подробные сведения о коэффициентах влагопроводности, используемых для расчетов продолжительности сушки, приводятся в курсе гидротермической обработки древесины [54].

Среди промышленных способов сушки наибольшее распространение имеют атмосферная и камерная. При атмосферной сушке пиломатериалов [22] в штабелях на открытом воздухе продолжительность сушки сравнительно велика. Так, по данным Ф.И. Коперина и Н.П. Федышина (АЛТИ), время, необходимое для того, чтобы свежеспиленные сосновые доски толщиной 35–50 мм в климатических условиях северной зоны достигли транспортной влажности (22 %), следующее: при укладке досок для сушки в апреле-мае 43–51 сут., июне-июле 22–43 сут., августе-сентябре 43–51 сут. Тем не менее, этот способ сушки достаточно широко используется, так как он дешевле камерной сушки.