

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ЛЕСА И ДРЕВЕСИНЫ

Том LI

**СТРОЕНИЕ
И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ДРЕВЕСИНЫ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Москва — 1962 — Ленинград

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий том Трудов посвящен результатам исследований строения, физических и механических свойств древесины, проведенных в Лаборатории древесиноведения Института леса АН СССР. По содержанию представленных здесь работ данный том может быть подразделен на две части. К первой относятся работы по анатомическому строению древесины, ко второй — работы по физическим свойствам и физике древесины.

Вопросы анатомического строения древесины освещены в пяти статьях. В первой статье В. Е. Москалевой предложен ключ для определения пород хвойных древесных растений СССР по продольным срезам. Такой ключ необходим в случае затруднений в получении поперечных срезов — при хрупкой древесине, как например погребенной в земле или измельченной в процессе производства бумаги, древесных пластиков и т. п. Во второй статье этого автора подытоживаются основные работы по изучению строения клеточных оболочек. В последние годы за рубежом появилось много исследований по этому вопросу, в которых широко применена электронная микроскопия. Сводка имеющихся работ, проводившихся в этом направлении в разных странах, вполне своевременна. В третьей работе Москалевой исследуются изменения, постепенно происходящие в древесине при длительном пребывании ее в земле. В данной работе делается первый шаг в ряду исследований, имеющих целью выяснить с различных сторон тонкое строение и свойства клеточных оболочек и их отдельных слоев, играющих существенную роль во всех без исключения физико-химических процессах промышленной обработки древесины.

В первой статье Л. А. Лебедеко проводится сравнительный анатомический анализ древесины некоторых видов порядка *Fagales*, прослежен онтогенез стволовой и корневой древесины семи его главнейших представителей. У растений с высокоорганизованной древесиной (дуб, каштан, бук) отмечаются более выраженные различия в зрелой древесине корней и ствола. Лебедеко дает некоторую физиологическую и филогенетическую интерпретацию полученного материала. Во второй статье того же автора, посвященной вопросам экологической анатомии, описывается древесина арктической ивы с мыса Челюскин. В работе выявляются отличительные особенности по размерам анатомических элементов, обусловленные воздействием угнетающих факторов на растение, а также по ряду новых диагностических признаков, вырабатывающихся в эволюции этого вида в связи с условиями его обитания.

Физическим свойствам и вопросам физики древесины посвящено семь статей. В статье В. А. Баженова поставлен вопрос о применении метода определения пьезоэффекта к выявлению симметрии строения древесины, исходя из ориентации содержащейся в ней целлюлозы. Этим методом анализируются различные структурные элементы древесины, взаимоотношение тканей и их роль в анизотропии свойств древесины. Полученные результаты указывают на возможность количественной характеристики ориентации целлюлозы в древесине, в древесных и целлюлозных материалах, что важно для изучения анизотропии этих материалов и регулирования ее в известных пределах с помощью различных обработок.

В первой статье Ю. М. Иванова исследуется недавно обнаруженное высокоэластическое состояние древесины и условия выхода целлюлозы вторичных оболочек из состояния естественного застеклования. Изучение поставленных здесь вопросов, касающихся природы механических свойств древесины, должно приблизить нас к пониманию самого механизма разрушения древесины — одного из наиболее сложных вопросов физики древесины, имеющего в то же время существенное значение для многообразных видов промышленного использования этого ценного природного материала. Во второй работе того же автора ставится вопрос, имеющий принципиальное значение, — о возможном различии состояний застеклования природной целлюлозы в древесине, возникающих в разных условиях.

Дальше следуют две статьи по вопросам механических свойств древесины. В работе К. С. Александрова описано применение к определению упругих характеристик древесины разработанного автором импульсного ультразвукового метода, основанного на измерении скорости распространения в древесине упругих волн высокой частоты.

Статья Н. Н. Красулина содержит результаты исследования микро-механическим методом микроскопических изменений строения древесины при сжатии поперек волокон и выявляет роль кривизны годичных слоев при этом виде напряженного состояния древесины.

В третьей статье Ю. М. Иванова изложены результаты изучения давления набухания и деформации разбухания древесины натуральной, предварительно подвергнутой обжатию и замораживанию, а также показавшей высокоэластические свойства. Впервые сделано определение давления набухания вдоль волокон, выявлена температурная зависимость давления набухания, высказаны соображения с целью объяснения наблюдаемых явлений с точки зрения молекулярного строения целлюлозы.

В следующей работе того же автора описываются опыты, позволившие выявить продольное удлинение и укорочение древесины при набухании, их кинетику и температурную зависимость, анализируются возможные причины этих деформаций. Кроме того, делается попытка объяснить их, исходя из свойств целлюлозы вторичных оболочек как высокополимерного вещества. Этими работами выясняется еще мало изученный до настоящего времени процесс набухания анизотропного геля, играющий существенную роль в технологии сушки, пропитки и облагораживания древесины. Глубокая исследовательская разработка указанной проблемы в настоящее время остро необходима для возможности быстрого прогресса данной перспективной области технологии древесины.

К этим работам примыкает статья того же автора, посвященная истории первых исследований явлений коробления древесины, выполненных в середине прошлого столетия русскими учеными.

Последняя статья тома касается вопросов исторического древесиноведения, которое, по мере накопления фактического материала и обобщений, начинает оформляться в самостоятельный раздел древесиноведения. Статья В. Е. Вихрова и Б. А. Колчина посвящена обработке и применению древесины в древнем Новгороде. Изучение особенностей использования деревянных изделий из археологических раскопок, с широким диагнозом пород древесины, открывает новые возможности в раскрытии важных сторон развития материальной культуры человека. Оно доставляет также ценные сведения о сохранности древесины и о процессах ее деградации в различных условиях.

Изданием настоящего тома Институт стремился обратить внимание работающих в области изучения и практического использования древесины отечественных пород на некоторые проблемы строения и физики древесины.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ПРОДОЛЬНЫМ СРЕЗАМ ДРЕВЕСИНЫ ХВОЙНЫХ ПОРОД, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ В СССР

В. Е. МОСКАЛЕВА

Определение древесины по микроскопическим признакам давно вошло в употребление и дает хорошие результаты. В настоящее время имеется ряд русских и иностранных определителей древесины, приведенных нами в списке литературы, с помощью которых можно без особого труда установить род, а в отдельных случаях — даже вид древесины.

Определение древесины обычно начинают с исследования ее поперечного сре-

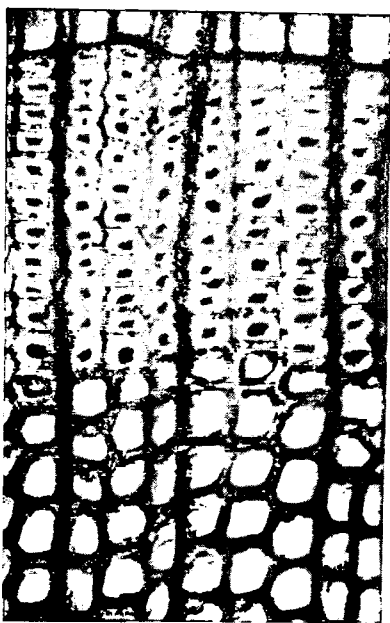


Рис. 1. Поперечный срез древесины лиственницы. Резкий переход между ранней и поздней древесиной в пределах одного годичного слоя.

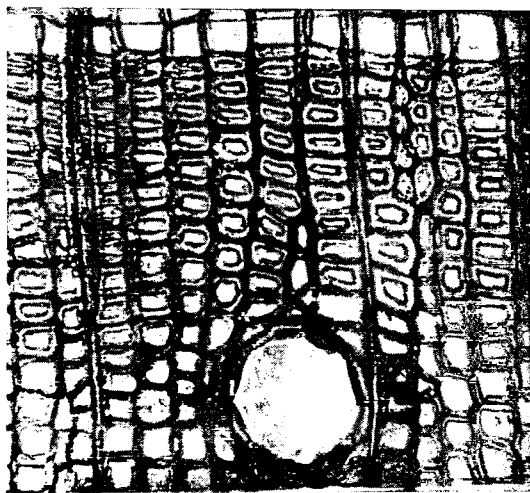


Рис. 2. Поперечный срез древесины ели. Постепенный переход между ранней и поздней древесиной в пределах одного годичного слоя.

за, далее переходят к радиальному и тангентальному. Однако бывают случаи, когда получение поперечных срезов сильно затрудняется. Например, древесина, длительное время пролежавшая в земле, отличается большой хрупкостью. Без предварительной обработки и заливки поперечные срезы с нее получить трудно. Иногда приходится иметь дело с измельченной древесиной для бумажной промышленности, а также с различными изделиями из древесной массы. Во всех этих случаях получение продольных срезов значительно проще и быстрее.

Это побудило составить ключ для определения хвойных пород по продольным срезам древесины. Были взяты породы, произрастающие

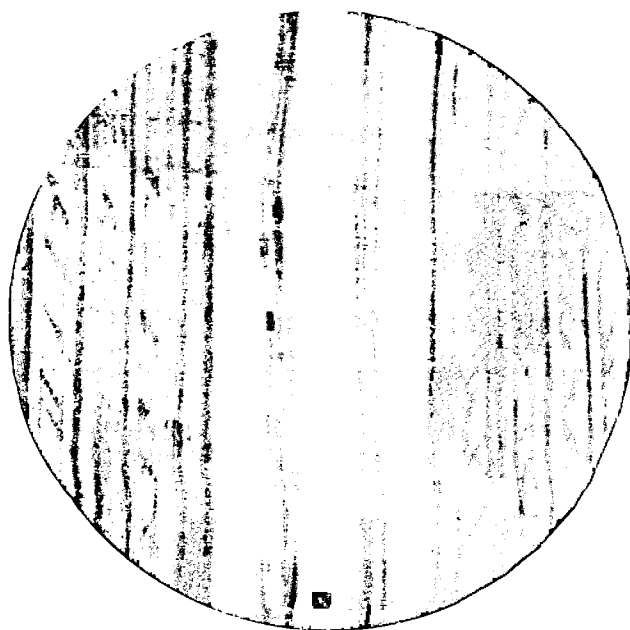


Рис. 3. Радиальный срез древесины лиственницы. Резкий переход между ранней и поздней древесиной.

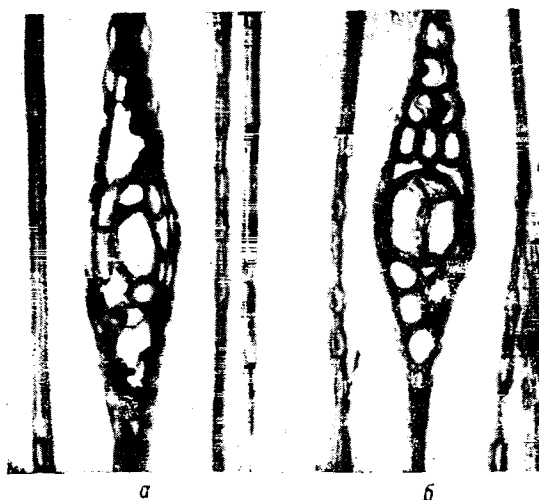


Рис. 4. Тангентальный срез древесины сосны. Горизонтальный смоляной ход (*a* — открытый, *b* — закрытый) с тонкостенными эпителиальными клетками.

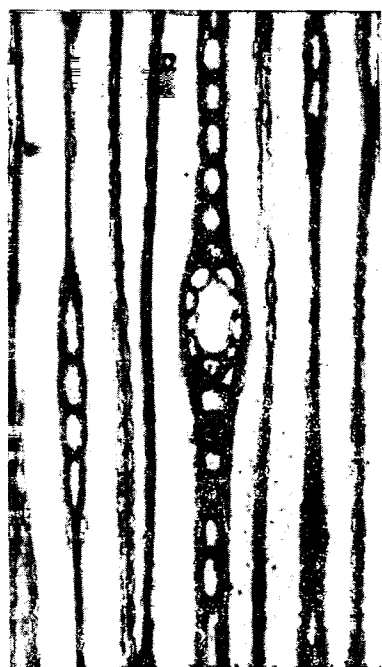


Рис. 5. Тангентальный срез древесины лиственницы. Горизонтальный смоляной ход с толстостенными эпителиальными клетками.

в СССР, так как практически приходится иметь дело в основном с ними. Для составления такого ключа были использованы соответствующие ма-



Рис. 6. Тангентальный срез *Taxus* L. Спиральные утолщения на стенках трахеид.



Рис. 7. Радиальный срез древесины сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.). Волнисто изогнутые с зубчатыми утолщениями внешние стенки краевых трахеид.

териалы, а также собственный опыт определения древесины по микроскопическим признакам.

Древесина хвойных пород отличается от древесины лиственных простотой и однообразием строения. Весной образуется ранняя часть годичного слоя, состоящая из тонкостенных трахеид с большими полостями, во второй половине вегетационного периода — поздняя часть годичного слоя, включающая в себя толстостенные трахеиды с малыми полостями. Между поздней древесиной одного года и ранней следующего года резко выражена линия раздела, поэтому годичные слои ясно различимы. Резкость перехода между ранней и поздней древесиной в пределах одного годичного слоя у разных представителей хвойных растений неодинакова и при определении может служить отличительным признаком. Например, лиственницу легко отличить от ели благодаря резкому переходу от ранней древесины к поздней в пределах одного годичного слоя (рис. 1 и 2). Эту резкость перехода можно наблюдать и на радиальном срезе древесины лиственницы (рис. 3).

Один из важнейших признаков при определении — присутствие или отсутствие в древесине смоляных ходов. Они бывают вертикальные и горизонтальные. Обычно о наличии смо-



Рис. 8. Радиальный срез древесины сосны кедровой (*Pinus koraiensis* Sieb. et Succ.). Внешние стенки краевых трахеид гладкие.

ляных ходов судят по обнаруживанию вертикальных [смоляных ходов на поперечных срезах древесины. Однако надежнее и проще] наблюдать присутствие горизонтальных смоляных ходов на тангентальных срезах

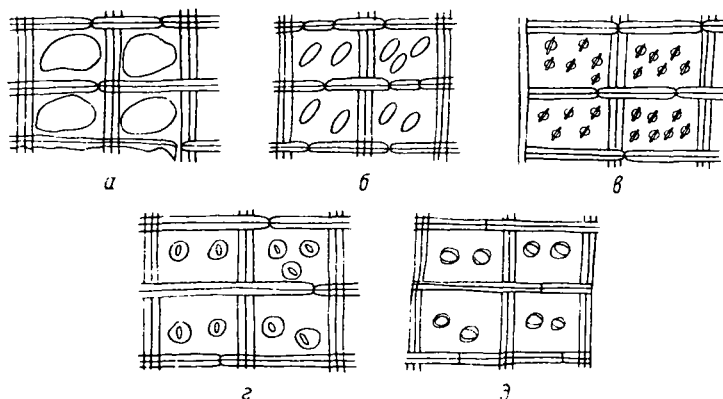


Рис. 9. Различные типы пор на поле перекреста сердцевинных лучей с трахеидами: а — оконцовые, б — пиноидные, в — пинеоидные, г — купрессоидные, д — таксоидоидные.

древесины, в сердцевинных лучах. Наличие горизонтальных смоляных ходов обуславливает присутствие вертикальных смоляных ходов; вертикальные смоляные ходы бывают иногда явлением патологическим,

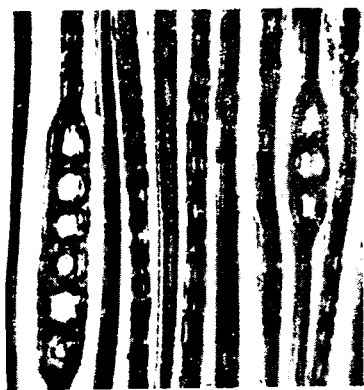


Рис. 10. Тангентальный срез древесины кипариса (*Cupressus* L.). Строение сердцевинных лучей.

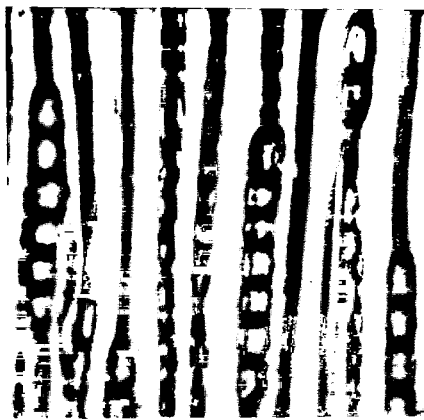


Рис. 11. Тангентальный срез древесины можжевельника (*Juniperus* L.). Строение сердцевинных лучей.

случайным и встречаются только в отдельных годовичных слоях. Горизонтальных смоляных ходов в таких случаях в сердцевинных лучах не обнаруживается.

Наличие нормальных смоляных ходов сразу выделяет целую группу хвойных, к которым принадлежат 3 рода: сосна (*Pinus* L.), ель (*Picea* L.) и лиственница (*Larix* L.). Смоляные ходы сосны по строению резко отличаются от смоляных ходов ели и лиственницы; эпителиальные клетки

смоляных ходов сосны тонкостенны, а ели и лиственницы имеют толстые стенки (рис. 4 и 5).

При определении надо учитывать также отдельные признаки, специфичные для какого-нибудь отдельного рода, например спиральные утолщения на стенках трахеид, характерные для *Taxus* L. (рис. 6), или зубчатые перепоночки окаймленных пор трахеид, характеризующие *Cedrus* (Tourn.) Mill.

Особенное внимание при определении следует обратить на строение сердцевинных лучей на радиальных срезах древесины. Наличие трахеид в сердцевинных лучах характеризует роды *Pinus*, *Picea*, *Larix*. У *Abies* и *Juniperus* изредка можно встретить отдельные, неправильной формы трахеиды по краям луча. Обычно при определении такие трахеиды во внимание не принимаются. По очертанию внешних стенок краевых трахеид луча можно отличить сосну обыкновенную (*Pinus silvestris* L.) от сосны кедровой (*Pinus sibirica* Mayr, *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.); у сосны обыкновенной внешние стенки краевых трахеид волнисто изогнутые, с зубчатыми утолщениями (рис. 7), у сосны кедровой они гладкие (рис. 8).

Одним из основных диагностических признаков является строение и количество пор на поле перекреста сердцевинных лучей с трахеидами. Имеется несколько типов пор: оконцовые, пиноидные, пицеоидные, таксоидные и купрессоидные. Все эти типы пор изображены на рис. 9. Имеет значение также толщина и пористость горизонтальных стенок луча, а также наличие или отсутствие индентур.

На тангентальном срезе нужно также обращать внимание на форму и толщину клеток сердцевинных лучей. Например, у кипариса (*Cupressus* L.) клетки округлые, толстостенные, ярко очерченные (рис. 10), у можжевельника они эллиптические, продолговатые (рис. 11). Еще более нежные очертания стенок клеток лучей у туи, имеющих тоже продолговатую эллиптическую форму (рис. 12).

На основе всего изложенного предлагаем ключ для определения по продольным срезам основных хвойных пород, произрастающих в СССР.

**КЛЮЧ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ХВОЙНЫХ ПОРОД
(ПО ПРОДОЛЬНЫМ СРЕЗАМ)**

1. Смоляные ходы в лучах имеются (тангентальный срез) 2
 - Смоляных ходов в лучах нет 5
2. Эпителиальные клетки смоляных ходов тонкостенны, на радиальных срезах на поле перекреста лучей с трахеидами по одной-две большие оконцовые или пиноидные поры 3
- Эпителиальные клетки смоляных ходов толстостенны. На радиальных срезах, на поле перекреста сердцевинных лучей с трахеидами по две-четыре мелкие пицеоидные поры 4



Рис. 12. Тангентальный срез древесины туи западной (*Thuja occidentalis* L.). Строение сердцевинных лучей.

3. Внешние стенки краевых трахеид луча волнисто изогнутые, с зубчатыми утолщениями. Сосна обыкновенная — *Pinus silvestris* L.
— Внешние стенки краевых трахеид луча гладкие Сосна кедровая — *Pinus sibirica* Mayr, *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.
4. Переход между ранней и поздней древесиной одного года резкий. Внешние стенки краевых трахеид лучей гладкие, волнисто изогнутые Лиственница — *Larix* L.
— Переход между ранней и поздней древесиной в пределах годичного слоя постепенный. Внешние стенки краевых трахеид луча прямые или слегка волнистые, часто с мелкозубчатыми утолщениями Ель — *Picea* L.
5. Стенки трахеид со спиральными утолщениями . . . Тис — *Taxus* L.
— Стенки трахеид без спиральных утолщений 6
6. Замыкающие перепонки окаймленных пор трахеид гладкие, зазубрены Кедр — *Cedrus* Mill.
— Замыкающие перепонки окаймленных пор трахеид гладкие, не зазубрены 7
7. Сердцевинные лучи состоят только из паренхимных клеток, однорядные. На поле перекреста лучей с трахеидами по две-четыре маленькие неясно выраженные таксоидионные поры 8
— Сердцевинные лучи состоят только из паренхимных клеток. Лучи однорядные и двухрядные. На поле перекреста сердцевинных лучей с трахеидами по одной-две ясно выраженные купрессоидные поры (в краевых клетках встречается до четырех пор) 9
8. Древесная паренхима отсутствует или очень скудная у границы годичного слоя. Трахеиды имеют окаймленные поры на тангентальных стенках. Горизонтальные стенки сердцевинных лучей толстые, сильно пористые. Инdentуры имеются Пихта — *Abies* Mill.
— Древесная паренхима имеется. На тангентальном срезе клетки сердцевинных лучей эллиптические. Горизонтальные стенки сердцевинных лучей тонкие, с малым количеством пор. Инdentуры имеются Туя — *Thuja* Tourn.
9. Клетки сердцевинных лучей на тангентальном срезе почти круглые, толстостенные, ясно очерченные. Древесная паренхима встречается. Тангентальные стенки клеток сердцевинного луча тонкие, гладкие, с малым количеством пор. Горизонтальные стенки клеток луча гладкие или со слабо выраженной пористостью Кипарис — *Cupressus* L.
— Клетки сердцевинных лучей на тангентальном срезе эллиптические, продолговатые. Паренхима обильная, в древесине ядра содержащее паренхимных клеток окрашено. На тангентальных стенках обилие пор. Тангентальные стенки клеток луча пористые. Горизонтальные стенки клеток луча тонкие, пористые; инdentуры имеются Можжевельник — *Juniperus* L.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- А б р а м е н к о С. Н. Определитель древесины главнейших пород СССР. Гослестехиздат, 1935.
- В и х р о в В. Е. Диагностические признаки древесины главнейших пород СССР. Гослестехиздат, 1947.
- Г а м м е р м а н А. Ф., А. А. Н и к и т и н, Т. Л. Н и к о л а е в а. Определитель древесины по микроскопическим признакам. Изд. АН СССР, 1946.
- Д ж о н с В. С. Древесные породы, их строение и отличительные признаки. М., 1932.
- И в а н о в Л. А. Анатомия растений. М.—Л., 1939.
- С у к а ч е в В. Н. Таблица для определения древесины по микроскопическим признакам. Определитель древесных пород. Гослестехиздат, 1940.

- Турский М. К. Определение древесины, ветвей и семян главнейших древесных и кустарных пород по таблицам. М., 1908.
- Яценко-Хмелевский А. А. Древесины Кавказа. Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1954.
- Brown H. P. and A. Y. Panschin. Commercial Timbers of the United States. New York and London, 1940.
- Desch H. E. Wood Anatomy. 2. Structure and Utilization Wood, v. 15, № 1, 1950.
- Greguss P. Xylotomische Bestimmung der Heute Lebenden Gymnospermen. Akademiai kiado. Budapest, 1955.
- Jacquot C. Atlas d'anatomie des bois des conifères. Paris, 1955.
- Wiesner Y. Die Bohstoffe des Pflanzenreichs, II. Leipzig, 1918.
- Wilson E. H. The conifers and Taxodes of Japan, 1916.
-

СТРОЕНИЕ КЛЕТОЧНОЙ СТЕНКИ ДРЕВЕСИНЫ

В. Е. МОСКАЛЁВА

Строение клеточной стенки древесины изучено еще недостаточно, хотя необходимость в этом назревает с каждым днем. Остается неясной роль клеточной стенки при взаимодействии древесины с водой, а также при механических воздействиях. О строении клеточной стенки имеется много работ. Этим вопросом занимались и биологи, и химики, и физики. В более старых работах, заложивших основы познания строения клеточной стенки (Bailey, 1920, 1923; Ritter, 1934, 1949; Frey-Wyssling, 1936, 1937, и др.), изучение производилось методом обычного микроскопического исследования. Позднее появились работы по исследованию клеточной стенки лучами Рентгена, и, наконец, за последнее время, начиная с 1948—1949 гг., усиленно развивается электронная микроскопия (Hodge, Wardrop, 1950; Muhlethaler, 1950a, 1950b, 1953; Bosshard, 1952; Frey-Wyssling, 1953a, 1953b, 1957, и др.).

Из работ по строению клеточной стенки, проведенных в СССР, следует отметить интересные труды В. Г. Александрова с сотрудниками (1925, 1927, 1937), изучавшего клеточную стенку в процессе ее развития, работы Е. Е. Успенского (1921) по оптическим свойствам и структуре растительных клеточных стенок, А. Н. Бояркина (1934, 1936) по изучению субмикроскопического строения растительных волокон и П. Н. Одинцова с сотрудниками (1957) — по набуханию клеточных стенок в различных реагентах.

В настоящей статье сделан краткий обзор наиболее существенных работ и освещено строение клеточной стенки древесины на основе современных данных, полученных различными исследователями.

Уже сложившаяся клеточная стенка состоит из трех оболочек: срединной пластинки, вторичной и третичной оболочек. Под термином срединная пластинка объединяются два первичных слоя соседних клеток и срединный слой между ними, образованный изотропным веществом. Одревеснение сглаживает разницу между этими слоями, и при рассматривании в микроскоп они кажутся однородной блестящей пластинкой. Лишь в поляризованном свете в этой пластинке видны три слоя: темный средний, состоящий из аморфного изотропного вещества, и два блестящих слоя, каждый из которых является первичным слоем оболочки одной из двух соседних клеток. За последнее время термин «срединная пластинка» часто применяется к срединному слою, соединяющему две первичные оболочки соседних клеток, а две первичные оболочки со срединным слоем между ними называют «сложной срединной пластинкой».

На рис. 1 изображены трахеиды сосны в поперечном разрезе. Здесь хорошо заметны срединные пластинки и вторичные оболочки. Что касается третичной оболочки, у сосны она не выявляется, даже путем окраски хлор-цинк-иодом. По определению Риттера (Ritter, 1925), выделявшего срединную пластинку из клетки при помощи микроманипулятора, в срединной пластинке оказалось лигнина больше, чем в других слоях.

Приводим содержание лигнина:

	Во вторичной оболочке	В срединной пластинке
Ольха . . .	7.3%	19.5%
Сосна . . .	6.9	13.4

Несмотря на недостаточную точность метода исследования, основное положение нашло подтверждение в других работах (Lange, 1954; Wardgor, 1954a; Northcote, 1958).

В первичной оболочке содержится максимальное количество лигнина, достигающее до 70% веса всех веществ. Во вторичной оболочке лигнина значительно меньше (20—30%).

Срединный слой, остающийся темным в поляризованном свете, содержит, кроме лигнина, пектиновые вещества. Первичная оболочка состоит из целлюлозы и, возможно, целлюлозанов и пектиновых веществ (Никитин, 1951). По мере созревания клеточной стенки в первичной оболочке вместе со срединным слоем откладывается много лигнина и все три слоя—две первичные оболочки и срединный слой между ними кажутся однородной срединной пластинкой. Первичная оболочка мало анизотропна и плохо растворима. Изучение структуры первичной оболочки в поляризованном свете и при помощи лучей Рентгена показало, что, в противоположность параллельной волокнистой текстуре вторичного слоя, в первичном слое текстура рассеянная, с предпочтением к поперечному направлению.



Рис. 1. Поперечный срез древесины сосны. Строение клеточной оболочки. Ув. 1875.

Вторичные оболочки отличаются в стенках древесины особой мощностью, и в них часто обнаруживается сложное строение. Они состоят из лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз (Никитин, 1951). Кроме указанных веществ, в древесине имеются и вещества, экстрагируемые спирто-бензолом. Если последовательно путем растворения удалить указанные составные части древесины, то оставшееся вещество сохраняет микроструктурный рисунок древесины. Риттер (Ritter, 1949) пробовал из одного образца удалить лигнин и оставить в нем холоцеллюлозу. Микроструктура сохранялась. Вторым образцом он обработал растворителями целлюлозы, оставляя лигнин. Микроструктурный рисунок древесины сохранился, так как лигнин в основном находится в срединной пластинке. Третий образец, не экстрагированный, был сожжен в атмосфере, частично озонированной кислородом в точно регулируемой электрической печи с расчетом удалить из древесины все органические вещества. Вес образца золы составлял 0.4% от веса неэкстрагированной древесины, при этом сохранялся микроструктурный рисунок. Древесный уголь, полученный различными способами, также сохраняет микроструктурный рисунок

настолько четким, что по нему можно легко определить породу древесины. Рис. 2 показывает строение березового, рис. 3 — елового угля (Москалева, 1949).

У большинства древесных растений вторичная оболочка имеет три отличающиеся друг от друга слоя: узкие, внутренний и внешний слои, обладающие более высоким показателем преломления, и широкий средний слой, отличающийся более низким показателем преломления. На тонких точно поперечных срезах при наблюдении между скрещенными николями поляризационного микроскопа внешний и внутренний слои сверкают, средний же слой выглядит изотропным или заметно более слабо двоякопреломляющим. Колебания в толщине вторичной оболочки трахенд и либ-

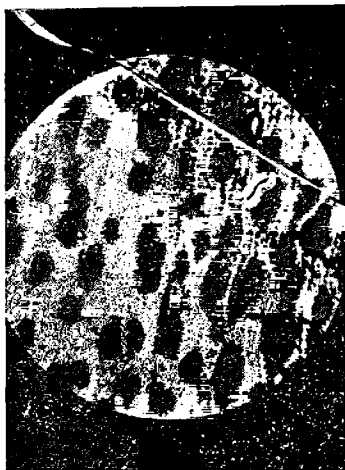


Рис. 2. Поперечный разрез березового угля. Ув. 52.

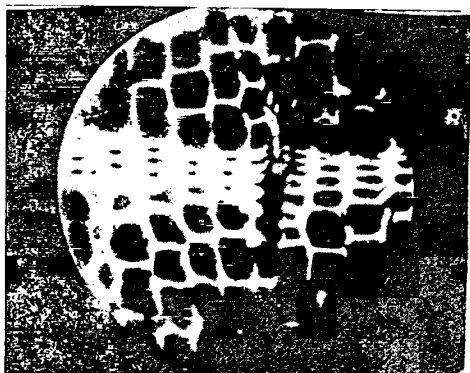


Рис. 3. Поперечный разрез елового угля. Ув. 175.

риформа вызываются в основном изменениями ширины среднего центрального слоя. В сосудах же, наоборот, колебания в толщине вторичной оболочки вызваны изменениями в ширине двоякопреломляющих слоев. Вторичная оболочка клеточной стенки обладает слоистостью, которая хорошо заметна на поперечных срезах. Эта слоистость бывает различных типов. Концентрическая слоистость хорошо заметна в трахеидах креновой древесины сосны, ели, пихты и других хвойных пород, в так называемых желатинозных волокнах тяговой древесины вяза, дуба, тополя и в некоторых типах лубяных волокон. Смена более пористых и менее рыхлых слоев различна по занимаемому ими пространству, т. е. слои эти колеблются от ясно видимых на необработанных срезах до таких, ширина которых лежит за пределами видимости, за исключением тех случаев, когда они сильно набухли в связи с действием реагентов.

Кроме концентрических структур, имеются также структуры радиальные. В толще таких клеточных стенок слоев, чередующиеся по своей плотности радиально, простираются во всю длину волокна. Имеются также структуры радиально концентрические, наиболее усложненные и разнообразные структурные схемы. В этом комбинированном типе как более пористые, так и более плотные части матрицы ветвятся и сливаются друг с другом в такой степени, что клеточная стенка и на поперечном, и на продольном срезе имеет более или менее решетчатый вид. Иногда последовательно образуемые области клеточной стенки дают

внезапный переход от одного типа структуры к другому. Все эти типы, слоистости подробно описаны у Бейли (Bailey, 1938).

У одного и того же растения встречаются переходы от одного типа клеточной оболочки к другому, от концентрического к радиально-концентрическому или радиальному.

Работая с поперечными срезами сосны, при действии медноаммиачного раствора мы получили концентрическую слоистость (рис. 4), при высушивании же этих срезов ясно выступала радиальная ориентация (рис. 5). Это наводит на мысль, что в одних и тех же клетках имеется как концентрическая, так и радиальная слоистость, выступающая при



Рис. 4. Поперечный срез древесины сосны после обработки Швейцеровым реактивом. Концентрическая слоистость оболочек. Ув. 1125.



Рис. 5. Поперечный срез древесины сосны после обработки Швейцеровым реактивом и высушивания. Радиальная слоистость оболочек. Ув. 1200.

определенных воздействиях на древесину. Эти типы слоистости являются следствием многообразного движения протоплазмы в процессе отложения клеточных стенок.

Связь между плазмой и оболочкой клеточной стенки установлена уже давно. Нэгели (Nägeli, 1877) и другие исследователи пишут, что стенка образуется на поверхности протопластов или внутри живой субстанции. Беккер (Becker, 1937) рассматривает клеточную стенку как внешний слой протоплазмы. Фрей-Висслинг (Frey-Wissling, 1952) подробно говорит о возникновении клеточной стенки при делении клеток камбия.

В 60-х годах минувшего столетия рост клетки объяснялся теорией внедрения, согласно которой стенка растет в толщину через интусусцепцию, через внедрение новых частичек между старыми; слоистость же объяснялась тем, что однородная вначале клеточная стенка расщеплялась на слои различной плотности. Различие в плотности зависит от различного содержания воды и определяет характер лучепреломления. Позднее эта теория Нэгели была сильно поколеблена и ученые возвратились к господствовавшей ранее теории наложения. По теории наложения слои образуются последовательно, в направлении снаружи внутрь, и самый внутренний слой стенки, непосредственно прилегающий к содержимому, есть наиболее молодой, а самый наружный — первичная оболочка. Против теории Нэгели возражали Диппель (Dippel, 1878), Страсбургер (Strass-

burger, 1882) и ряд других исследователей. Впоследствии, однако, Страсбургер наряду с наложением стал признавать и внедрение (по Бородину, 1938). Фрей-Висслинг (Frei-Wyssling, 1936) отмечает, что при росте меристематических клеток интусусцепция играет главную роль. В определенных точках происходит разрыхление и внедрение новых частиц, причем это разрыхление протекает не во всех участках одновременно и целая связная система не нарушается. В клетках древесины первичная оболочка образуется путем интусусцепции. Вторичная оболочка, наряду с ростом путем наложения, содержит в себе и элементы интусусцепции.

Стенка живой клетки, кажущаяся сплошной, пронизана сквозными канальцами, при посредстве которых устанавливается связь между содержимым смежных клеток.

Бэйли (Bailey, 1938) представлял стенку клетки как целлюлозную матрицу, сложенную из скопления тяжей или фибрилл, скрепляемых не только «посторонним цементирующим веществом», но и боковыми разветвлениями. Он считал, что клеточная стенка — целостная система анизотропной целлюлозы, сложная структурная схема которой в основном зависит от вариации в размере, числе и расположении сливающихся, удлинённых агрегатов цепей молекул. Матрица имеет пористое строение, и ее удлинённые сообщающиеся между собой полости могут быть заполнены различными нецеллюлозными веществами, образуя таким образом две непрерывные системы, взаимопроникающие друг в друга. В древесине как хвойных, так и лиственных пород структура вторичной оболочки волокна обладает широкими пределами изменчивости.

По определению Бэйли, клеточная оболочка, состоящая из непрерывной, жестко связанной матрицы целлюлозы, обладает структурно ослабленными плоскостями и может быть соответственно разрушена механической или химической обработкой на фрагменты, различные по форме и размеру: слои, пластины, фибриллы, цилиндриды, веретеновидные тельца, эллипсоидальные частицы, дерматозомы, сферические отдельности и пр. Мельчайшие из этих образований — основные структурные единицы целлюлозы связаны между собой нецеллюлозными веществами в фибриллы, которые затем слагаются в слоистые элементы, образующие в свою очередь слои и клеточные оболочки различной толщины.

Основные единицы целлюлозы можно считать относительно постоянными по объему, но остальные показатели сильно варьируют. Относительно дерматозом, например, Визнер утверждает (Wiesner, 1892), что их диаметры равны 0.4 и 0.5 μ , эллипсоидальным частицам приписывался размер 1.1 и 1.5 μ (Strassburger, 1882). Размер фибрилл по первоначальным данным был 0.4 μ , а по некоторым — 1.1 μ или даже более 3—4 μ . Слоистые элементы имеют размеры не более 0.1 μ и не могут быть построены из больших элементов. Бэйли совершенно правильно подчеркивает, что клеточные стенки высших растений являются не только чрезвычайно усложненными образованиями, но и обладают гораздо более широким рядом изменчивых форм, структур, видимых под микроскопом, чем это предполагалось. Ориентация фибрилл изменяется не только от растения к растению, от ткани к ткани и в разных типах клеток, но даже в различных частях одной и той же клетки. Можно сделать грубую ошибку, думая, что волокна какой-нибудь специализированной ткани или целого растения характеризуются специфической схемой структуры или постоянной ориентацией фибрилл.

Для изучения расположения фибрилл применяются разнообразные методы:

- 1) прямое наблюдение видимых фибрилл и полосатости;

2) метод, состоящий в наблюдении отверстий пор и механически полученных трещин, основанный на уверенности, что эти отверстия ориентированы параллельно фибриллярной оси;

3) метод, при котором наблюдают углы затухания, дихронизм и другие явления в поляризованном свете;

4) рентгеноскопия;

5) измерение при помощи электронного микроскопа.

Каждый из этих методов дает интересный материал, но к каждому нужно подходить очень осторожно в применении к клеточным стенкам смешанных типов. Даже в том случае, когда скопления фибрилл, видимые как спиральные полосы, заметны при наблюдении поверхности ненабухшей вторичной оболочки, часто трудно установить, распространяется ли данная специфическая структура по всей толще клеточной стенки или она ограничена одним только ее внешним слоем.

Применение набухания для выявления более тонкой структуры клеточной стенки эффективно по отношению к широкому центральному слою вторичной оболочки, но такая обработка обычно маскирует структуру внутреннего и внешнего слоя оболочки. Длинная ось щелевидных отверстий пор ориентирована параллельно оси фибрилл среднего слоя, но ориентировка фибрилл внешнего и внутреннего слоев остается неизвестной. У клеток с тонкой стенкой по отверстиям пор нельзя судить о направлении фибрилл.

Поляризованный свет мог бы помочь в определении угла наклона фибрилл в тех случаях, когда он проходит через единичные слои; однако трудно установить истинный угол отдельных слоев, когда слои разной толщины и с разной ориентировкой фибрилл налагаются друг на друга. На поперечных срезах вторичных оболочек удалось определить, что фибриллы среднего слоя ориентированы более параллельно длинной оси волокна по сравнению с фибриллами наружных и внутренних слоев. Но установить на продольных срезах, ориентированы ли элементы структуры в этих слоях под прямым углом к оси волокна или под некоторым другим, очень трудно. То же и при изучении рентгенограмм.

Лучшим методом для определения угла наклона фибрилл в различных слоях клеточной оболочки является метод Бейли и Весталь (Bailey a. Vestal, 1937). Этот метод заключается в следующем: срезы одревесневших тканей хлорируют, промывают 95-процентным этиловым спиртом, обрабатывают разведенным в крепком спирте аммиаком, промывают спиртом, окрашивают 2—4-процентным водным раствором йода в йодистом кали и монтируют под покровным стеклом в капле 60-процентной серной кислоты. После такой обработки в слоях вторичной оболочки образуются темно-коричневые кристаллы йода. Кристаллы, очевидно, возникают в удлиненных пространствах целлюлозной матрицы и ориентированы параллельно длинной оси фибрилл целлюлозы. Таким методом авторы установили, что ориентированность фибрилл в наружном слое вторичной оболочки сильно варьирует.

У некоторых исследованных образцов древесины структурные элементы целлюлозы имеют склонность располагаться под прямым углом к длинной оси клетки в тех областях ранних трахеид, где нет окаймленных пор, и имеют спиральную ориентацию в гомологичных частях поздних трахеид. У других образцов расположение может быть спиральным как в ранней, так и в поздней древесине (рис. 6), или же оно меняется от трахеиды к трахеиде в пределах всего годового кольца. В областях расположения окаймленных пор можно видеть круговое расположение целлюлозных частиц, в соседних же с порой областях клеточной стенки

ориентировка фибрилл несколько видоизменяется. Ориентация фибрилл в центральном слое вторичной оболочки также изменяется от образца к образцу, от трахеиды к трахеиде и в различных частях одной и той же клетки. В областях расположения окаймленных пор фибриллы не лежат по кругу или концентрически, как это наблюдается во внешнем слое вторичной оболочки, — они проходят по кривым линиям около окаймленных пор и через них.



Рис. 6. Тангентальный срез древесины сосны. Спиральная ориентация структурных элементов в трахеидах сосны. Ув. 400.

Расположение фибрилл нормальных трахеид, волокнистых трахеид и волокон либриформа во внешнем слое вторичной оболочки изменяется от расположения фибрилл под прямым углом к продольной оси клетки до различных степеней распределения по спирали, в центральном же слое — от спирального до продольного (рис. 7, 8). Стенки сосудов сравнительно тонкие, их вторичная оболочка трехслойна. Расположение целлюлозных элементов в таких трехслойных вторичных клеточных стенках сосудов колеблется в большей степени, чем в нормальных трахеидах. Так, внешний слой может быть ориентирован под прямым углом к длинной оси клетки, или же он имеет

спиральное расположение, при незначительном угле наклона спирали. Центральный слой имеет либо параллельную ориентацию, либо слабо вы-

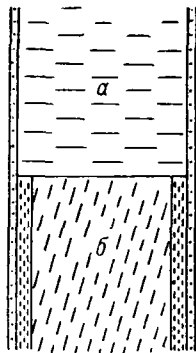


Рис. 7. Схематическое изображение ориентации целлюлозы во внешнем (а) и в центральном (б) слоях тангентальной стенки ранней трахеиды (по Бейли).

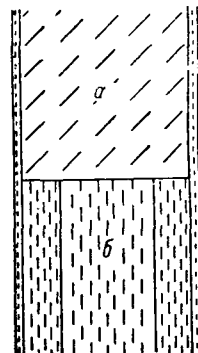


Рис. 8. Схематическое изображение ориентации целлюлозы во внешнем (а) и в центральном (б) слоях тангентальной стенки поздней трахеиды (по Бейли).

раженную спиральную. По мере специализации сосудов они обнаруживают склонность к образованию вторичной оболочки с большим числом и разнообразием структурных усложнений.

Исследуя темп роста *Pinus longifolia* Roxb., отклонение угла спирали от вертикали и длину трахеид, Мизра (Misra, 1939) нашел корреляцию эксцентрициитета радиального роста наклона волокон и ориентации частиц клеточной стенки. Кругизна мицеллярной спирали больше с той стороны, где меньше радиальный рост. Длина трахеид также коррелирует с эксцентрицитетом радиального роста, а следовательно, и с углом наклона спирали мицеллярной ориентации. Престон (Preston, 1949) установил соотношение между углом наклона спирали и изменением длины клеток камбия. Он сделал попытку объяснить спиральный рост стенки клетки и рассчитать его математически. При увеличении длины клетки спираль фибриллярной ориентации становится круче. Трахеиды креновой древесины бывают значительно короче, чем нормальной, и угол спирали по отношению к продольной оси клетки больше. Сокращение длины трахеид, происходящее при образовании креновой древесины, вызывало увеличение радиального прироста. Это результат увеличения числа антиклинальных делений в камбии. Описывая спиральное строение хвойных, Престон обращает внимание на то, что трахеиды древесины располагаются в дереве не параллельно длине ствола, а наклонно, образуя спирали по стволу.

Как видно из всего сказанного, строение клеточной стенки древесных растений было основательно изучено при помощи обычного светового микроскопа. Позднее более детальное исследование клеточной оболочки проведено посредством лучей Рентгена и при помощи электронного микроскопа. Прежде чем говорить об этих исследованиях, следует остановиться на общих взглядах на строение целлюлозы, основного компонента древесины. Эти взгляды подробно освещены в трудах Н. И. Никитина (1951), З. А. Роговина и К. В. Шорыгиной (1953), П. Н. Одинцова (1957), В. А. Баженова (1959) и некоторых других авторов.

Мицеллярная теория строения целлюлозы подверглась строгой критике. Еще в 1934—1936 гг. А. Н. Бояркин, исследуя строение волокна, возражал против представления о существовании обособленных кирпичикообразных мицелл, обладающих одинаковыми размерами и совершенной пространственной решеткой. Он считал, что длинные молекулярные цепи высокомолекулярных веществ образуют лишь приблизительную и далеко не такую совершенную решетку, как настоящие кристаллы. Состояние, в котором находятся волокна, является промежуточным между кристаллическим и аморфным — такое состояние называют мезаморфным.

Большинство исследователей в своих взглядах на строение целлюлозы исходило из отсутствия реальных поверхностей раздела в мицеллах. З. А. Роговин считал, что под термином «мицелла» следует понимать отдельный участок цепей, в котором расстояние между последними минимальное, и вследствие этого он обладает высшей кристаллографической ориентацией и максимальной энергией связи. Согласно новой мицеллярной теории, целлюлоза состоит не только из кристаллических областей, где цепи параллельно ориентированы и прочно удерживаются межмолекулярными силами, но и из неориентированных областей (аморфной части), где нет полной взаимонасыщенности цепей и где довольно легко могут происходить взаимодействия целлюлозы с другими веществами (Никитин, 1951).

Советскими учеными было выдвинуто также новое представление, согласно которому целлюлоза и ее производные имеют аморфное строение (Каргин и Лейпунская, 1940, 1941). При этом, однако, сохраняется положение о существовании в волокне участков различной структуры анизотропии (различной упорядоченности микромолекул).

По исследованиям Фрей-Висслинга (Frey-Wyssling, 1951, 1952, 1953a, 1953b, 1955, 1957), целлюлоза кристаллизуется в растительных клеточных стенках — частично в полностью упорядоченных областях, частично в паракристаллических. Микрофибриллы достаточно сближены, и слияние пучков возможно. С помощью электронного микроскопа этому исследователю удалось установить боковые связи в клеточных стенках.

Рассматривая строение клеточной стенки, необходимо остановиться на самом начале ее развития. Только в этом случае делаются понятными многие детали строения, мало заметные в уже сложившейся клеточной стенке. Прежде всего необходимо остановиться на меристематической образовательной ткани — камбии.

Планомерным исследованием камбия с 1920 г. занимался Бейли (Bailey, 1923, 1932, 1933; Bailey a. Faul, 1934). Прежде всего встает вопрос: однорядна или многорядна ткань камбия? Одни исследователи считали, что камбием можно назвать лишь один слой меристематических клеток с недифференцированной структурой клеточной стенки. По мнению других, к камбию следует отнести также анатомические элементы с начинающейся дифференциацией. Беннен (Vanhan, 1951) считает, что имеется один ряд инициальных клеток камбия, который производит материнские клетки ксилемы и флоэмы, причем деление в сторону ксилемы происходит гораздо чаще, чем в сторону флоэмы.

Каждая камбиальная клетка содержит одно ядро, расположенное центрально. Образование клеточной пластинки своеобразно. Веретено сильно расширяется по бокам из-за прибавления волокон, возникающих по периферии, и постепенно принимает изогнутую форму. По мере того, как периферические волокна постепенно накапливаются и примыкают к веретену, остатки центрально расположенных волокон исчезают вдоль по клеточной пластинке, оставляя два отдельных скопления волокон, соединенных между собой в первую очередь образовавшимся участком клеточной пластинки. Такие скопления киноплазматических волокон, которые могут быть названы киноплазмосомами, имеют очень характерную форму и строение. Они распространяются поперек клетки под прямым углом к длинной оси последней, от одной радиальной стенки к другой, и располагаются в центре протопласта, пересекая его по середине в тангентальной плоскости. Киноплазмосома во время процесса деления клетки движется в противоположных направлениях, каждая к своему концу клетки. По мере продвижения киноплазмосом и клеточная пластинка, образовавшаяся путем слияния капелек нектинного происхождения, нарастает до тех пор, пока не достигнет того и другого конца клетки, разделяя протопласт на две равные части, из которых каждая содержит по одному дочернему ядру. Оба ядра остаются в центре своей клетки во все время процесса образования клеточной пластинки. Начальные камбиальные клетки покрытосемянных короче камбиальных клеток голосемянных. Средняя длина клеток голосемянных равна 3400 μ , двудольных — 600 μ . Тип кариокинетического процесса в камбиальных клетках голосемянных и покрытосемянных одинаков.

Камбиальные клетки бывают двух типов: 1) многочисленные большие, значительно вытянутые параллельно длинной оси стебля, и 2) разбросанные скопления мелких изодиаметрических клеток, которые своим делением образуют горизонтальные слои радиально расположенной паренхимы — сердцевинные лучи. Основное деление обоих типов начальных камбиальных клеток параллельно тангенсу окружности ствола. Тангентальный диаметр камбиальных начальных клеток увеличивается до некоторого определенного размера в течение ранних стадий разрастания ствола в толщину.

Скоро такого увеличения камбиальных клеток в тангентальной плоскости становится недостаточно, чтобы компенсировать быстрое увеличение периферии камбия. Деление камбия в радиальной плоскости характерно для клеток камбия ярусного типа, расположенных правильными горизонтальными рядами. Эти клетки образуются без значительного удлинения их концов, поэтому они почти одинаковой длины. Ярусный тип камбия присущ высоко специализированным древесным растениям. У большинства же пород камбиальные клетки имеют разную длину и не образуют правильных горизонтальных рядов. Они достигают определенной длины, затем делятся более или менее косыми перегородками пополам, которые в свою очередь разрастаются в длину и вновь делятся. Длина камбиальных клеток сильно колеблется.

Число клеток по окружности в основном увеличивается благодаря поперечному делению камбия, вытягиванию и вклиниванию вновь образующихся клеток между уже имеющимися камбиальными клетками. Рост клетки происходит продвижением ее концов между клетками верхнего и нижнего рядов в то время, когда вторичное утолщение еще не начиналось. Так протекает рост «вторжением» концов клеток в то время, как средняя часть клетки не изменяется. При росте вторжением кончик клетки проходит между смежными клетками. Камбиальные клетки лучей по величине своей такого же порядка, как и недифференцированные клетки зародыша или клетки конечной меристемы в точках роста. Вследствие наступления ненормальных окружающих условий, например при повреждении, длинные камбиальные клетки могут быть стимулированы к делению на мелкие изодиаметрические. Период, потребный для совершения процесса образования клеточной пластинки, равен нескольким часам. Клетки камбия по длине своей различны в различных частях растения, различны при различных условиях местообитания, различны у различных групп сосудистых растений.

Бейли (Bailey, 1923) подсчитал, что за 60 лет периферическое увеличение кольца камбия у *Pinus strobus* достигло 60-кратного размера, а число начальных клеток с 724 увеличилось до 23 100, причем длина их возросла в 5 раз.

Исследования Бенена (Bannan, 1941, 1942, 1944, 1950, 1951, 1952, 1953, 1954, 1955, 1956; Bannan a. Whalley, 1950) уточнили и дополнили наши представления о камбии и происходящих из него тканях у хвойных растений.

Образующиеся из камбия клетки бывают различной длины, некоторые из них продолжают делиться вновь, другие же постепенно исчезают. Наблюдая ложнопоперечное деление камбиальных клеток и их постепенное укорачивание, Бенен (Bannan, 1951) заметил, что идущие один за другим сегменты клетки укорачиваются через следующее периклиальное деление и таким образом получают первоначальные клетки лучей. Бенен в других своих работах (Bannan, 1955) говорит о продуцировании камбием вторичной ксилемы и флоэмы. В состоянии покоя камбий ствола зрелых деревьев содержит 1—4 ряда клеток. От одного до трех тангентальных рядов клеток по направлению ксилемы состоят из ксилемных материнских клеток, а единственный ряд около флоэмы — из материнских клеток флоэмы. Первыми начинают делиться ксилемные материнские клетки, соприкасающиеся с поздней древесиной прошлого года, первоначальные же клетки — позднее, хотя здесь встречаются разные варианты. Зона периклиального деления быстро расширяется до 100—300 μ в сильных деревьях. Больше всего делений в течение весенней волны роста. От середины июня до августа наблюдается уменьшение

клеточной продукции. Развитие флоэмы начинается позднее, чем ксилемы.

Об удлинении камбиальных клеток говорит Бенен в своей работе 1956 г. (Banban, 1956). Он отмечает отсутствие единства в росте соседних клеток. Одна клетка может удлиниться более чем на миллиметр на одном конце и очень мало на противоположном, соседняя же клетка растет в противоположном направлении. Некоторые клетки удлиняются в равной степени на обоих концах. При ложнопоперечном делении часть клеток погибает, часть уменьшается до лучевых камбиальных клеток, часть удлиняется до нормальных размеров. Обычно погибают более укороченные клетки. На выживание клеток влияет также степень их соприкосновения с лучами. Удлинение первоначальных камбиальных клеток обычно максимально в течение ранних стадий уменьшающейся камбиальной активности, примерно от середины июня до конца июля.

Исследования при помощи электронного микроскопа подтвердили и значительно пополнили наши представления о строении клеточной оболочки. Так, электронномикроскопическое исследование рами, проведенное А. Л. Зайдес и И. Г. Сеницкой (1951), показало, что полученная электроннограмма для рами в точности повторяет рентгенограмму. Полученные результаты показывают, что в природной целлюлозе, в отличие от ранее исследованных клеток, имеются области, геометрически упорядоченные с микрокристаллическим строением.

Престон и Николаи (Preston a. Nicolai, 1948), исследуя стенки клеток *Valonia ventricosa* при помощи электронного микроскопа, подтвердили расположение и ориентацию фибрилл, установленные ранее при помощи лучей Рентгена.

Фрей-Висслинг, Мюлетхалер и Виков (Frey-Wyssling, Mühlethaler u. Wyckoff, 1948), исследуя тонкое строение растений и культур целлюлозообразующих бактерий, подтвердили существование прекрасной фибриллярной текстуры под электронным микроскопом. Диаметр микрофибрилл по их измерениям был 250—300 Å.

Фрей-Висслинг и Мюлетхалер (Frey-Wyssling u. Mühlethaler, 1949), исследуя при помощи электронного микроскопа клеточные стенки хлопкового и льняного волокон, установили параллельную текстуру вторичной оболочки и рассеянную текстуру первичной. Диаметр целлюлозных нитей, по их измерениям, около 20 Å. Рост клеточной стенки, по наблюдениям этих и последующих исследователей, заключался не в укрупнении образовавшихся микрофибрилл, а в увеличении их числа, причем в поверхностном росте первичной стенки отмечено их взаимное переплетение.

Наблюдая рост кончиков корней при помощи электронного микроскопа, Фрей-Висслинг и Штегер (Frey-Wyssling u. Steeher, 1951) указывали на биполярный рост концов клеток, а также на увеличение площади клетки через своеобразное разрыхление сетки и дополнительное вплетение новых фибрилл. Они показали, что интусусцепция состоит из «мозаичного» роста.

О «мозаичном» росте говорит также Боссхэрд (Bosshard, 1952); исследуя при помощи электронного микроскопа рост клеточной стенки древесины ясеня (*Fraxinus excelsior*), он установил, что вся стенка клетки не участвует одновременно в процессе роста и что увеличение поверхности является суммой увеличений местных ограниченных площадей. Поверхностный рост волокон и трахеид в течение дифференциации выражается в местном росте кончика клетки. Это так называемый «мозаичный рост», при котором в первичной стенке образуется микрофибриллярная целлюлозная сетка, тесно сплетающаяся с новыми микрофибриллами целлюлозы.

Существование такой сетки в первичной оболочке устанавливали Ходж и Вардроп (Hodge, Wardrop, 1950), Мюлетхалер (Mühlethaler, 1950a), О'Келли и Кэпп (O'Kelley a. Carr, 1954). Более детальное изучение строения первичной оболочки клеток показало, что она имеет различные слои с различной ориентацией микрофибрилл. Так, Релофсен (Roe-lofsen, 1951) нашел, что с внешней стороны первичных оболочек микрофибриллы имеют тенденцию к продольному расположению и образуют сетку, внутри же, ближе ко вторичному слою, наблюдается более поперечная ориентация. Изучая стенки клеток камбия *Pseudotsuga taxifolia*, *Larix leptolepis* и *Populus* sp. при помощи электронного микроскопа, Престон и Риплей (Preston, Ripley, 1954) заметили, что первичная стенка камбия состоит из сетки перепутанных микрофибрилл, погруженных в аморфный материал. Они считают, что это фибриллы целлюлозы, аморфный же материал представляет собой пектиновые вещества.

Фрей-Висслинг, Мюлетхалер и Виков (Frey-Wyssling, Mühlethaler u. Vickoff, 1948) также обнаружили сетчатую структуру первичной клеточной оболочки; Вардроп и Дадсвелл (Wardrop, Dadswell, 1950), исследуя строение клеточных стенок древесной паренхимы и клеток сердцевинных лучей, нашли ориентацию фибрилл в первичной оболочке, близкой к перпендикулярной в отношении продольной оси клетки.

Следовательно, различные ученые в зависимости от объекта наблюдения или от степени развития клеточной стенки наблюдали или сетчатую структуру первичной оболочки, или же структуру с ориентацией фибрилл, близкой к поперечной в отношении продольной оси клетки. Чрезвычайно усложненная схема образования клеточной стенки древесных растений заставляет для понимания процесса обратиться иногда к исследованиям образования клеточной стенки более примитивных растений. Так, очень интересным является исследование с помощью электронного микроскопа развития меристематической ткани корешка лука. Авторы этого исследования — Скотт, Хемнер, Беккер и Боулер (Scott, Hamner, Becker a. Bowler, 1956) установили, что клеточная стенка имеет четыре фазы развития: 1) сетчатая стадия, когда в тонкую и ослабленную сетку вплетаются новые микрофибриллы и клетка увеличивается в объеме; 2) стадия, в течение которой микрофибриллы последнего слоя первичной оболочки появляются в ориентации, перпендикулярной к продольной оси клетки; в это же время кончик стенки клетки может иметь сетку микрофибрилл; 3) активное удлинение клетки характеризуется появлением перекрещивающихся микрофибрилл; эта ориентация ведет к периоду, когда рост уменьшается и останавливается; в течение этого периода микрофибриллы вновь ориентированы как сплетенная сеть; 4) формирование вторичной оболочки с характерной спиральной ориентацией микрофибрилл. Эта схема постепенного развития клеточной стенки проливает свет на некоторые детали строения, выявленные и уточненные при помощи электронного микроскопа.

В основном работа с электронным микроскопом подтверждает данные, полученные при помощи обычного светового микроскопа и рентгена.

Ходж и Вардроп (Hodge a. Wardrop, 1950), изучая электронные микрофотографии реплик вторичной стенки трахенд хвойных, получили диаметр микрофибрилл 50—100 Å. По измерениям Вардропа (Wardrop, 1954a) диаметр микрофибрилл 250—300 Å. По измерениям же Ренби и Рибби (Ränby a. Ribi, 1950) диаметры микрофибрилл от 50 до 100 Å, примерно равные диаметрам ранее измеряемых при помощи рентгена мицелл. Очевидно, микрофибриллы не что иное, как ранее называемые мицеллы целлюлозы. На основе современных взглядов на строение целлюлозы

к этому выводу приходит и Яблоков (Jablokoff, 1955). Последнее время термин «мицелла» не применяется вовсе; во всех работах говорится о микрофибриллах как составной части стенки клетки.

Вторичная стенка клетки, имея в основном спиральное расположение микрофибрилл, состоит из трех слоев: внешнего, центрального и внутреннего. Как уже сказано, во внешнем и внутреннем слоях вторичной стенки расположение фибрилл меняется от расположения фибрилл под прямым углом к продольной оси клетки до различных степеней по спирали; в центральном же слое фибриллы расположены от спирального до продольного направления.

Это подтвердилось исследованием и при помощи электронного микроскопа. Так, Вардроп и Дадсвелл (Wardrop, 1954a; Wardrop a. Dadswell, 1955, 1957; Wardrop, 1957), подробно освещая строение клеточной стенки хвойных пород, обнаружили в первичной оболочке значительную дисперсию ориентации, близкую к поперечному направлению; во вторичной же — спиральную ориентацию. Для строения трахеид креновой древесины характерно отсутствие третичного слоя. Угол наклона фибрилл в центральном слое $40-45^\circ$, во внешнем — $80-90^\circ$.

Представляют интерес исследования японских ученых. Харада, Кичима и Кадита (Harada, Kichima u. Kadita, 1951) подтвердили различие в ориентации микрофибрилл во внешнем и центральном слоях вторичной оболочки, а также кругообразное расположение частиц около пор. По исследованиям этих ученых, в ранней древесине микрофибриллы центрального слоя на тангентальной стенке менее наклонны, чем на радиальной, в поздней древесине — наоборот. Харада и Миясаки (Harada, Miyazaky, 1952) при помощи электронного микроскопа исследовали строение окаймленных пор и расположение фибрилл во вторичной оболочке трахеид различных японских хвойных пород. Харада исследовал под электронным микроскопом строение сердцевинных лучей хвойных пород. Им было исследовано 29 родов и 39 видов хвойных, произрастающих в Японии (Harada, Kichima, Kadita, 1951; Harada, 1955).

Кросс и Риттер (Cross a. Ritter, 1939) при помощи рентгеновых лучей исследовали расположение мицелл в сердцевинных лучах белого дуба и нашли, что частицы целлюлозы имеют спиральное расположение в клетках сердцевинных лучей, подобно тому, как это наблюдается в древесных волокнах. Результаты этих исследований совпадают с результатами микроскопических наблюдений, полученных Риттером и Митчеллом (Ritter a. Mitchell, 1939).

Клеточные стенки обычно пористые, тонкие капилляры могут быть в целлюлозной решетке. Вардроп (Wardrop, 1954b), исследуя волокна при помощи электронного микроскопа, обрабатывал их хлоридом золота. Таким образом измерялись участки между смежными микрофибриллами. Ширина этих участков примерно $70-100 \text{ \AA}$.

Исследования субмикроскопической структуры при помощи электронного микроскопа, проведенные Мюлетхалером (Mühlethaler, 1953), Престоном и Риплей (Preston a. Ripley, 1954), а также Вардропом (Wardrop, 1958), в основном подтвердили выявленное ранее строение клеточной стенки растений.

Азунмаа (Asunmaa, 1955) сравнивал строение срединной пластинки, исследованное с помощью электронного микроскопа, со строением срединной пластинки в ультрафиолетовом свете.

Известно, что после набухания в Швейцеровом реактиве различные слои клеточной стенки трахеиды ведут себя различно. Первичная оболочка, вследствие сильного набухания вторичной оболочки, разрывается и со-

бирается в складки на концах вздутия вторичной оболочки. Третичная оболочка имеет вид спирали внутри клеточной стенки. Это показано на рис. 9. Среди исследователей существуют разногласия, создаются ли явления стягивания первичной оболочкой или же наружным слоем вторичной оболочки. Это имеет значение для бумажной промышленности, однако до сих пор конкретного ответа на данный вопрос нет. Эмертон и Гольдсмит (Emerton a. Goldsmith, 1956) выявили, что легкая механическая обработка мацерированных трахеид сосны частично удаляет относительно широкую область внешнего слоя. Этот внешний слой состоит из системы параллельных фибрилл, идущих по спирали под большим углом к продольной оси клетки. Первичную оболочку можно отличить от вторичной по ее текстуре сплетения.

Текстильные волокна после гидролиза в кислоте, высушивания и последующего набухания в едком натре образуют поперечные трещины в стенке клетки. Ни одно из исследований структуры стенок клеток под электронным микроскопом не указало на существование поперечных структурных элементов в стенках клеток, поэтому объяснение следует искать в волокнистой фибриллярной структуре вторичной оболочки, описанной ранее. Фрей-Висслинг (Frey-Wyssling, 1936) указывал, что действие кислотного гидролиза заключается в нарушении продольной непрерывности мицеллярной системы, а это увеличивает хрупкость, сокращает устойчивость против растяжения и понижает степень полимеризации гидролизированных волокон целлюлозы. Всякое механическое разрушение и напряжение в волокне будет вести к развитию поперечных трещин в гидролизированных волокнах. У большинства волокон появляются площадки скольжения и разрушения при сжатии. В древесине такие дефекты происходят естественным путем, что было показано при исследовании древесины, не подвергавшейся механическим воздействиям (Москалева, 1940; Баженов, 1949).

Фрей-Висслинг (Frey-Wyssling, 1951) предположил существование субмикроскопического смещения частиц, которое происходит через более или менее одинаковые интервалы вдоль волокна, и полагал, что в этих местах существуют участки, подверженные действию химикатов. Однако подобные деформации должны были быть видны в электронный микроскоп, но они обнаружены не были.

Долмеч (Dalmetsch, 1954) в своей статье говорит о поперечно-спиральной структуре. Плоские спирали разрезают вторичную оболочку. При этом фибриллы, которые идут вдоль оси волокна с наклоном, пересекают толщу плоских спиралей, переходя из одного витка спирали в другой по всей длине волокна. Следовательно, поперечные спирали разрезают



Рис. 9. Набухание поздней трахеиды в реактиве Швейцера. Ув. 320.

все фибриллы, а фибриллы проникают через все плоские спирали. Толщина спирали 1—2 μ , т. е. соответствует в среднем длине молекулы целлюлозы со степенью полимеризации около 3000. Подъем спирали равен приблизительно 2—5°. Не остается сомнений, что степень уплотнения молекул вещества вдоль волокна неодинакова. Наиболее разрыхленные участки скорее доступны для кислот и других растворяющих реагентов и являются более слабыми местами при механическом разрушении. Их трудно увидеть в электронном микроскопе, так как при большом увеличении образуется очень маленькое поле зрения, а на степень разрыхления различных участков обращалось мало внимания. Степень же ориентации фибрилл настолько сильно изменяется на протяжении одного волокна, что трудно установить, одинакова ли она в участках различной плотности.

Кроме первичной и вторичной, у самой полости имеется еще третичная оболочка, или третичный слой, как его называют некоторые авторы. У хвойных его обнаружить нелегко. Мы обнаруживали третичную оболочку, действуя серной кислотой на поперечные срезы хлорированной древесины сосны. Вторичная оболочка растворялась, а третичная сохранялась в виде нерастворимого остатка в форме узкого кольца, непосредственно примыкающего к полости (Москалева, 1957). При растворении в реактиве Швейцера третичная оболочка остается в виде спирали при полном растворении других слоев, что указывает на ее большую устойчивость к химическим воздействиям. В древесных волокнах некоторых лиственных пород третичная оболочка окрашивается от хлор-цинк-иода в фиолетовый цвет (реакция на целлюлозу). Такой неодревесневший слой характерен для древесины бука, ивы, тополя, осины и ряда других пород. Этот признак в процессе эволюции древесных растений у некоторых пород закрепился настолько, что может служить отличительным признаком для данной породы. Большое развитие третичной оболочки можно наблюдать у тяговой древесины многих лиственных пород. В таких случаях третичную оболочку многие авторы называют желатинозным слоем, и по своим свойствам она несколько отличается от третичной оболочки обычных древесных растений. Подробное описание третичной оболочки некоторых хвойных пород дает Бюхер (Bücher, 1953, 1955). Он рассматривает третичную оболочку как индивидуальную стенку, обладающую химическим составом и свойствами, отличающимися ее от других оболочек. По исследованиям Бюхера, морфология третичной стенки различна у различных родов хвойных пород.

Изучение реакционной древесины указало на существование многих переходных форм, существующих между клеточными стенками обыкновенной, тяговой и креновой древесины. Вардроп и Дадсвелл (Wardrop a. Dadswell, 1955, 1957; Wardrop, 1956) указывали, что некоторые признаки носят не только микроскопический, но также и субмикроскопический характер.

О тонком строении волокон нормальной и тяговой древесины бука говорят Престон и Ранганатан (Preston a. Ranganathan, 1947). Нечесани (Necesany, 1956, 1957) считает, что третичная оболочка — морфологически неотделимая часть вторичной стенки. Степень ее развития, вид отложения микрофибрилл и лигнификация будут зависеть только от биохимических и биофизических процессов.

Мы склонны рассматривать третичную оболочку как часть клеточной стенки, не прошедшую конечной фазы развития. У некоторых пород такой фазой является одревеснение. У пород с одревесневшей третичной оболочкой ее трудно бывает отличить от вторичной оболочки. Ее отличие от вторичного слоя можно доказать только путем химической обработки

и при помощи поляризованного света. По своему субмикростроению третичная оболочка сходна с первичной. Расположение микрофибрилл рассеянное, близкое к поперечному в отношении продольной оси клетки.

Большой интерес представляет работа Бэйли (Bailey, 1957). В ней говорится о штриховатости, видимой в обычном микроскопе во вторичных стенках трахеид некоторых хвойных. Суммируя доказательства, полученные различными исследователями, в том числе и электронные микрофотографии, Бэйли указывает, что штриховатость во вторичных стенках хвойных пород состоит из агрегаций целлюлозных микрофибрилл, которые отделяются продолговатыми пространствами, ориентированными параллельно им. Такие структуры, видимые под обычным микроскопом, обеспечивают быстрый способ изучения варьирования в ориентации целлюлозы в различных частях вторичной стенки отдельной трахеиды, в различных трахеидах того же дерева и у различных хвойных деревьев. Свеже взятые образцы заболони обнаруживают на поперечных срезах характерную концентрическую, радиальную и радиально-концентрическую штриховатость. Бэйли изучал заболонь *Pinaceae*, *Taxodium* и *Sequoia*. Штриховатость имеет тенденцию исчезать, когда срезы монтируются в жидкостях с неблагоприятным индексом рефракции. Суммирование результатов всех имеющихся в этом направлении исследований показывает, что целлюлозные микрофибриллы во вторичной стенке трахеид хвойных часто собираются в агрегаты и становятся видными в обыкновенный микроскоп на продольных срезах свежесобранной заболони.

Интересны исследования Рибби (Ribi, 1953), который при помощи электронного микроскопа установил, что субмикроскопические фибриллы представляют собой реальные структурные элементы. Его исследования демонстрируют, каким образом эти фибриллы соединяются для образования характерных структурных моделей. Исследования проводились с древесиной бальзы (*Ochroma lagopus*) и тополя (*Populus tremuloides*). До сих пор исследования велись или методом реплик, или путем измельчения растительных волокон на тончайшие фрагменты. Рибби удалось получить тончайшие микротомные срезы, предварительно освобожденные от нецеллюлозных частей. Соответствующие микрофотографии подтверждают мнение, полученное косвенными методами, о противоположном направлении фибрилл в различных слоях вторичной оболочки. Поперечные срезы волокна тополя показывают зернистую структуру частиц в среднем величиной 50 Å. Подтверждаются результаты оптических наблюдений, показавших, что фибриллы во внешних слоях вторичной стенки более горизонтально расположены, чем в центральном слое. Пory кажутся окруженными стенкой, мало проницаемой для электронов. Толщина многих микрофибрилл около 100 Å.

Одной из наиболее интересных работ по строению клеточной оболочки при помощи электронного микроскопа является работа Фрея, Престона и Риплей (Frei, Preston a. Ripley, 1957), проведенная на тонких срезах древесины. Здесь интересен метод исследования, так как наряду с обычными поперечными и продольными срезами изучались косо-поперечные и косо-тангентальные срезы. Перед получением срезов кусочки древесины слегка делигнифицировали. Основной тип структуры клеточной стенки трахеид, полученный ранее различными методами, подтвержден. Центральный слой, S_2 , делится на пластинки, которые очень мало различаются между собой по ориентации. Наружный слой, S_1 , имеет два направления ориентации микрофибрилл, противоположные друг другу.

Интересные результаты дали исследования стенок клеток лучевой паренхимы. Пластинки в стенках этих клеток кажутся чередующимися

в направлении микрофибрилл, как три слоя, S_1 , S_2 и S_3 , во вторичной стенке трахенд. Наблюдаются два направления микрофибрилл: одно продольное к длине клетки, или крутые спирали, другое поперечное, или пологие спирали.

В несколько косо расположенных срезах более наглядно изображено тонкое строение клеточной оболочки и ориентация микрофибрилл.

Много внимания при работе с электронным микроскопом уделено строению окаймленных пор. По этому вопросу проведен ряд работ Лизе



Рис. 10. Окаймленные поры сосны: а — в разрезе на тангентальном срезе; б — на радиальном срезе, вид в плане.

с сотрудниками (Liese, 1953; Liese, Hartmann-Fahnenbrock, 1953; Liese u. Ingeborg, 1954). Изучались поры древесины ели обыкновенной (*Picea abies* = *P. excelsa*), пихты (*Abies alba* = *A. pectinata*) лжетсуги тиссолистной (*Pseudotsuga taxifolia* = *P. douglasii*), лиственницы (*Larix decidua*) и корсиканской сосны (*Pinus nigricans* var. *calabica*). Поры древесины ели, пихты, лиственницы и лжетсуги тиссолистной очень сходны между собой по внутренней и наружной структуре. Различия только в структуре внутренней стенки окаймленной поры. У ели, пихты, лиственницы и лжетсуги тиссолистной наблюдаются идущие по окружности фибриллы, как у сосны. Поскольку плотность закрытия пор у разных пород

бывает разной, нужно искать причину в существовании различий в конфигурации внутренних стенок пор. В тех случаях, когда торус и внутренняя стенка бывают гладкими, их соприкосновение вызывает силы сцепления, обеспечивающие плотное закрытие поры. Выпуклости, существующие у сосны, мешают плотному сцеплению настолько, что закрытая пора продолжает пропускать некоторое количество жидкости (рис. 10).

Исследователи, работавшие после Лизе над изучением строения окаймленных пор, пришли к заключению, что метод реплик не в состоянии показать наиболее тонкие детали строения окаймленных пор хвойных пород. Поэтому они проводили исследование на ультратонких срезах древесины. Фрей-Висслинг и Боссхэрд (Frey-Wyssling a. Bosshard, 1953) установили, что замыкающая перепонка состоит из двух первичных оболочек смежных клеток и срединного слоя между ними. Утолщенный слой у торуса не бесструктурный, как кажется по репликам, а состоит из целлюлозных фибрилл. В замыкающей перепонке поры имеют субмикроскопические размеры, и эта перепонка служит ультрафильтром при продвижении жидкостей.

Эйхе (Eiche, 1954), пользовавшийся при работе с электронным микроскопом также методом ультратонких срезов, наблюдал существование тонкой пленки между нитями, поддерживающими торус, которую было невозможно различить, пользуясь методом реплик. Ширина нитей от 200 Å до 400 Å. В первичных стенках целлюлозных волокон Эйхе обнаружил протоплазму. По его наблюдениям, целлюлозные фибриллы образуются по краям плазмы. В момент образования микрофибрилл существует срединный слой клеточной стенки, который впоследствии растворяется, вероятно, под действием окисления. Момент образования нитей наступает, по-видимому, одновременно с образованием первичной оболочки. Нити образуются одновременно с микрофибриллами торуса во время появления первого утолщения.

Эти наблюдения подтверждает также Стемсруд (Stemsrud, 1956). Представляет интерес найденный им в древесине швейцарских и норвежских сосен особый тип торусов, который в центральной части содержит крупные перфорации. Такие перфорированные торусы встречаются только в древесине сосны, у ели и лиственницы они не наблюдались. Это может быть одной из причин более легкой пропитки сосны по сравнению с елью и лиственницей. Боссхэрд (Bosshard, 1956) уточняет тонкое строение и также процесс образования торуса и образование пор в сосудах.

Строение клеточной стенки освещалось в учебниках по анатомии растений соответственно уровню развития науки в этом направлении. Ф. Н. Крашенинников (1937), Л. А. Иванов (1939), Ф. Раздорский (1949), Л. М. Перельгин (1953), В. Г. Александров (1953), А. А. Яценко-Хмелевский (1954), Страсбургер (в 1937 г.), Имс и Макданиэльс (в 1935 г.) освещают строение оболочки в своих монографиях. В нашем труде (Москалева, 1957) строению клеточной оболочки уделено много внимания. Некоторые интересные данные по этому вопросу содержит статья П. Н. Одинцова (1957). Н. И. Никитин в своей монографии «Химия древесины» (1951), содержащей наиболее исчерпывающие данные в области химии древесины, говорит как о строении древесины, так и о субмикроскопическом строении клеточной оболочки.

В одно целое объединено строение клеточной оболочки в монографии Престона (Preston, 1952). В ней подробно говорится о химическом составе отдельных слоев оболочки и об их тонком строении. Большая глава о тонком строении клеточной оболочки древесины имеется в монографии Джейн (Jane, 1956), содержащей много интересных данных о структуре древесины и ее свойствах, полезных для технологии.

Строению клеточной оболочки много внимания уделяет в своей разносторонней монографии также Бейли (Bailey, 1954). В книге по анатомии растений Изау (Esau, 1953) дана целая глава о строении оболочки, ее образовании и развитии. Представляет интерес также монография Фрей-Висслинга по данному вопросу (Frey-Wyssling, 1957).

Мы сделали лишь краткий обзор сведений, имеющихся по данному вопросу у нас и за рубежом. Изучение строения клеточной стенки продолжается при помощи всех изложенных методов, особенно посредством применения электронного микроскопа. Однако следует отметить, что работа с электронным микроскопом должна проводиться на основании и с учетом ранее проведенных исследований как с обычным световым микроскопом, так и при помощи рентгена. В некоторых случаях надо прибегать к гистохимическому анализу. В этом направлении работы нужно развивать — они имеют большую перспективу, особенно в познании свойств клеточных стенок. Каждый из всех описанных методов имеет свои досто-

инства и недостатки и взаимно дополняет друг друга. Полное представление о строении и свойствах клеточной стенки можно составить только при объединении результатов всех методов исследования.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- Александров В. Г. О генезисе утолщений на стенках сосудов. Журн. Русск. бот. общ., т. 10, 1925.
- Александров В. Г. Анатомия растений. Сельхозгиз, М., 1954.
- Александров В. Г. и К. Ю. Абесадзе. О развитии окаймленных пор в трахеидах сосны. Журн. Русск. бот. общ., т. 12, № 1—2, 1937.
- Александров В. Г. и Л. Н. Джапаридзе. Материалы к выяснению явлений раздревеснения и одревеснения клеточных оболочек. Журн. Русск. бот. общ., т. 12, 1927.
- Баженоев В. А. К вопросу о линиях скольжения во вторичном слое клеточных оболочек. Тр. Инст. леса АН СССР, т. IV, 1949.
- Баженоев В. А. Пьезоэлектрические свойства древесины. Изд. АН СССР, 1959.
- Бородин П. П. Курс анатомии растений. Сельхозгиз, 1938.
- Бояркин А. Н. Субмикроскопическая и микроскопическая структура растительных волокон. За новое волокно, № 5, 1934.
- Бояркин А. Н. Субмикроскопическая и микроскопическая структура текстильных волокон. Прилож. к переводу кн.: Астбери. Основы учения о структуре текстильных волокон. Гизлегпром, 1936.
- Зайдес А. Л. и И. Г. Синицкая. Электронографическое исследование природной целлюлозы. ДАН СССР, т. LXXX, № 2, 1951.
- Иванов Л. А. Анатомия растений. Гослестехиздат, 1939.
- Каргин В. А. и Д. И. Лейпунская. Дифракция быстрых электронов в тонких пленках гидратцеллюлозы. ЖФХ, т. 14, в. 3, 1940.
- Каргин В. А. и Д. И. Лейпунская. Дифракция быстрых электронов в тонких пленках эфиров целлюлозы. ЖФХ, т. 19, в. 9, 1941.
- Крашенинников Ф. Н. Лекции по анатомии растений. Гос. изд. биол. и мед. мат., М.—Л., 1937.
- Москалева В. Е. Механизм разрушения древесины при сжатии вдоль волокон. Техн. бюл. ЦНИИМОД, Наркомлес СССР, № 5, 1940.
- Москалева В. Е. Методика исследования строения древесины в отраженном свете. Тр. Инст. леса АН СССР, т. IV, 1949.
- Москалева В. Е. Строение древесины и его изменение при физических и механических воздействиях. Изд. АН СССР, 1957.
- Никитин Н. И. Химия древесины. Изд. АН СССР, 1951.
- Одинцов П. Н. Современные воззрения на строение целлюлозы и клеточной стенки растений. Тр. Инст. лесохоз. проблем. АН Латв. ССР, т. XII, Рига, 1957.
- Перелыгин Л. М. Строение древесины. Изд. АН СССР, 1953.
- Раздорский Ф. Анатомия растений. М.—Л., 1949.
- Роговин З. А. и К. В. Шорыгина. Химия целлюлозы и ее спутников. Гос. научно-техн. изд. хим. лит., М.—Л., 1953.
- Успенский Е. Е. Оптические свойства и структура растительных клеточных оболочек. Дневник съезда Русск. бот., Пгр., 1921.
- Фрей-Вислинг А. Субмикроскопическое строение протоплазмы и ее производных. М., 1950.
- Яценко-Хмельевский А. А. Основы и методы анатомического исследования древесины. Изд. АН СССР, 1954.
- Asunmaa S. Electron microscope studies on sections of Aspen sulphite pulp fibres. Svensk. Papp. Tidn., v. 58, № 2, 1955.
- Bailey J. W. The cambium and its derivative tissues. Am. J. Bot., v. 7, 1920; v. 10, 1923.
- Bailey J. W. Preliminary notes on cribriform and vested pits. Trop. Woods, v. 31, № 46, 1932.
- Bailey J. W. The cambium and its derivative tissues. VIII structure, distribution and diagnostic significance of vested pits in dicotyledons. J. Arnold Arbor., v. 14, 1933.
- Bailey J. W. Cellwall structure of higher plants. Ind. Eng. Chem., v. XXX, № 1, 1938.
- Bailey J. W. Contribution to plant Anatomy Waltham MASS. U. S. A., 1954.
- Bailey J. W. Aggregations of microfibrils and their orientations in the secondary wall of coniferous tracheids. Am. J. Bot., v. 44, № 5, 1957.

- Bailey J. M. and E. E. Berkeley. The significance of x-rays in studying the orientation of cellulose in the secondary wall of tracheids. *Am. J. Bot.*, v. 29, 1942.
- Bailey J. W. and A. F. Faul. The cambium and its derivative tissues IX structural variability in the redwood, sequoia sempervirens and its significance in the identification of passil woods. *J. Arnold Arbor.*, v. 15, 1934.
- Bailey J. W. and M. R. Vestal. The orientation of cellulosa in the secondary wall of tracheary cells. *J. Arnold Arbor.*, v. 18, 1937.
- Bannan M. W. Wood structure of *Thuja occidentalis*. *Bot. gaz.*, v. 103, 1941.
- Bannan M. W. Wood structure of the native Ontario species of *Juniperus*. *Am. J. Bot.*, v. 29, 1942.
- Bannan M. W. Wood structure of *Libocedrus decurrens*. *Am. J. Bot.*, v. 31, 1944.
- Bannan M. W. The frequency of anticlinal divisions in fusiform cambial cells of *Chamaecyparis*. *Am. J. Bot.*, v. 87, 1950.
- Bannan M. W. The annual cycle of size changes in the fusiform cambial cells of *Chamaecyparis* and *Thuja*. *Can. J. Bot.*, v. 29, 1951.
- Bannan M. W. The microscopic wood structure of North American species of *Chamaecyparis*. *Can. J. Bot.*, v. 30, 1952.
- Bannan M. W. Further observations on the reduction of fusiform cambial cells in *Thuja occidentalis* L. *Can. J. Bot.*, v. 31, 1953.
- Bannan M. W. Ring width, tracheid size and ray volume in stem wood of *Thuja occidentalis* L. *Can. J. Bot.*, v. 32, 1954.
- Bannan M. W. The vascular cambium and radial growth in *Thuja occidentalis*. *Can. J. Bot.*, v. 33, 1955.
- Bannan M. W. Some aspects of the elongation of fusiform cambial cells in *Thuja occidentalis* L. *Can. J. Bot.*, v. 34, 1956.
- Bannan M. W. and B. E. Whalley. The elongation of fusiform cambial cells in *Chamaecyparis*. *Can. J. Research*, v. 28, 1950.
- Becker W. A. Über die Entstehung der Vernarbungsmembranen. *Protoplasma*, Bd. XXVII, H. 3, 1937.
- Bosshard H. H. Elektronenmikroskopische Untersuchungen im Holz von *Fraxinus excelsior* L. *Berichte der Schweiz. Bot. Ges.*, Bd. 62, 1952.
- Bosshard H. H. Der Feinbau des Holzes als Grundlage technologischer Fragen. *Schweiz. Ztschr. f. Forstwesen*, v. 11, № 2, 1956.
- Bücher H. Die Tertiärlamelle von Holzfasern und ihre Erscheinungsformen bei Coniferen. *Hubegger Ag. Desendinden.*, 1953.
- Bücher H. Les discontinuités de structure des fibres naturelles. Structure lamellaire des fibres de bois et différenciation d'une parvitertiaire. 8 Congrès de l'Association Technique de l'Industrie Papetière (Papes). Grenoble, 1955.
- Cross S. T., G. L. Ritter, S. H. Clark. Arrangement of the cellulose. Crystallites in ray cells of white oak as determined by x-rays. *Pap. Tr. j.*, v. 109, № 23, 1939.
- Dadswell H. E. and A. B. Wardrop. The structure and properties of tension wood. *Holz-forschung*, Berlin, v. 9, 1955.
- Dalmetsch H. Über den Aufbau der Cellulose in den Zellwänden der pflanzlichen Faserzellen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, H. 11, 1954.
- Dippel L. Die neuere Theorie über die feinere Struktur der Zellhülle. Frankfurt, 1878.
- Eiche B. Beitrag zur Frage des Hofftupfelaues des Koniferen. *Ber. deutsch. bot. Ges.*, v. 69, 1954.
- Electron microscopy of fibres. *Nature*, London, v. 177, № 4503, 1956.
- Emerton H. W. and V. Goldmith. The structure of the Ontario secondary wall of Pine tracheids from kraft Pulp. *Holz-forschung*, v. 103, № 4, 1956.
- Esau K. *The Plant Anatomy*. New York, 1953.
- Frei E., B. D. Preston, F. B. S. and G. W. Ripley. The fine structure of the wall of Conifer Tracheids. *J. Exper. Bot.*, v. 8, № 22, 1957.
- Frey-Wyssling A. Der Aufbau des Pflanzlicher Zellwände. *Protoplasma*, Bd. XXV, H. 2, 1936.
- Frey-Wyssling A. Ultramikroskopische Untersuchungen der submikroskopischen Baue in Gerüstsubstanzen. *Protoplasma*, Bd. XXVII, H. 4, 1937.
- Frey-Wyssling A. Über verbändete Cellulose mikrofibrillen in Zellwänden. *Holz als Roh- und Werkstoff*, H. 9, 1951.
- Frey-Wyssling A. Growth of plant cellwalls symp. *Soc. exp. Biol.*, v. 6, 1952.
- Frey-Wyssling A. Über den Feinbau der Stauchlinien in überbeanspruchten Holz. *Roh- und Werkstoff*, Bd. XI, H. 7, 1953a.
- Frey-Wyssling A. Über die submikroskopische struktur der zellulosischen Elementarfibrillen. *Experimentia*, Bd. 9, № 5, 181, 1953b.
- Frey-Wyssling A. Plant cytology and the electron microscope. *Endeavour*, v. 14, 1955.
- Frey-Wyssling A. Macromolecules in cell structure. *Nature*, v. 11, № 4567, 1957.

- Frey-Wyssling A., H. H. Bosshard. Über den Feinbau der Schliesshäute in Hoftüpfeln. Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. XI, H. 11, 1953.
- Frey-Wyssling A. und K. Mühlethaler. Elektronenmikroskopie der pflanzlichen Zellwand. Zürich. Schweiz Bauzeitung, v. 15, 1949.
- Frey-Wyssling A., K. Mühlethaler und B. W. C. Wyckoff. Microfibrillenbau des Pflanzlichen Zellwändl. Experientia, v. IV, Fasc. 12, 1948.
- Frey-Wyssling A. und H. Stecher. Das Flächenwachstum der pflanzlichen Zellwänd. Experimentia, v. VII, Fasc. 11, 1951.
- Harada H. Electron-microscope investigation on the wartlike structure of conifer tracheids. J. Jap. Wood Res. Soc., v. 1, 1955.
- Harada H., T. Kichima und S. Kadita. Die Micellorientierung in der Sekundärwand von Tracheiden des Koniferen. The Micella Orientation in the secondary Wall of Coniferous tracheids. Wood Research (Japan), № 6, 1951. (Schriftumsberichte, Holz als Roh- und Werkstoff, H. 10, 1952).
- Harada H., J. Miyazaky. Electron-microscope study of compression wood. Bull. For. Exp. St. Meguro, Tongo, № 54, 1952 (Forestry Abstract, v. VII, № 3, 1953).
- Hodgkiss A. Y., A. B. Wardrop. An electron microscopic investigation of the cell wall organisation of conifer tracheids and conifer cambium. Ser. B, v. 165, № 4190, 1950.
- Jablouček A. Kh. Le bois d'épicea. Structure de la cellule. Revue de biologie et de ses applications, v. X, № 6, 1955.
- Jane F. W. The structure of wood. London, 1956.
- Jayme G. und M. Herders-Steinhäuser. Zugholz und seine Auswüchse in Pappel- und Weidenholz. Holzforschung, Bd. 7, H. 2/3, 1953.
- Lange P. W. The distribution of lignin in the cell wall of normal and reaction wood from spruce and a few hardwoods. Svensk. Papperstidning, v. 57, 1954.
- Liese W. Über die Hoftüpfel der Koniferen. Ber. deutsch. bot. Ges., Bd. 56, № 5, 1953.
- Liese W., M. Hartmann-Fahnenbrock. Elektronenmikroskopische Untersuchungen über die Hoftüpfel der Nadelhölzer. Biochimica et Biophys. Acta, v. 11, № 2, 1953.
- Liese W. und J. Ingeborg. Experimentelle Untersuchungen über die Feinstruktur der Hoftüpfel bei den Koniferen. Kurz Originalmitteilungen. Die Naturwissenschaften, H. 24, 1954.
- Liese W. und I. Johann. Elektronenmikroskopische Beobachtungen über eine besondere Feinstruktur der verholzten Zellwand bei einigen Koniferen. Planta, v. 44, № 3, 1954.
- Majumdar G. P. The sliding, gliding, symplastic or the intrusive growth of the cambium cells and their derivatives in higher vascular plants. J. Indian Bot. Society, v. 20, № 4, 1941.
- Misra P. Observations on spiral grain in the wood of *Pinus longifolia* Koxb. Forestry, v. XIII, № 2, 1939.
- Mühlethaler K. Electron microscopy of developing plant cell wall. Biochim., Biophys. Acta, v. 5, № 1, 1950a.
- Mühlethaler K. Elektronenmikroskopische Untersuchungen über den Feinbau und des Wachstum der Zellmembranen in Mais und Haferkoleoptilen. Ber. Schweiz. Bot. Ges., v. 60, 1950b.
- Mühlethaler K. Elektronenmikroskopische Untersuchungen an pflanzlichen Geweben. Ztschr. f. Zellforschung und microscop. Anat., H. 4, 1953.
- Nägeli. Über den Inneren Bau der vegetabilischen Zellmembranen. Sitzungsber. d. Bayerisch. Akad., v. 181, 1877.
- Necesaný V. Anatomie reakčního dřeva listopadu a submikroskopická morfologie jeho buněk. Repl. from Přírodovědy. Sborník Ostravské Kraje, Opava, v. 16, № 2, 1955.
- Necesaný V. Struktura reakčního dřeva. Prestia, v. 28, № 1, 1956.
- Necesaný V. The nature of the so-called Tertiary Lamella. Bratislava, Czechoslovakia. Repr. from Svensk Papperstidning, v. 60, 1957.
- Nortchote D. H. The cell walls of higher plants: their composition, structure and growth. Biological reviews, v. 33, № 1, 1958.
- O'Kelly J. C. and P. H. Carr. An electron micrographic study of the cell walls of elongating cotton fibers, root, hairs and pollen tubes. Am. J. Bot., v. 41, 1954.
- Phillips E. W. Y. Influence of leaf activity on the composition of wood cell wall. Nature, London, v. 174, № 4419, 1954.
- Preston B. D. Spiral structure and spiral growth. The Development of Grain in Coniferen. Forestry, v. XXIII, № 48, 1949.
- Preston B. D. The molecular architecture of plant cell walls. London, 1952.
- Preston B. D. and E. Nicolai. An Electron Microscope study of cellulose in the wall of *Valonia ventricosa*. Nature, № 4121, 1948.

- Preston B. D. and V. Ranganathan. The fine structure of the fibres of normal and tension wood in beech (*Fagus sylvatica* L.) as revealed by x-rays. *Forestry*, v. XXI, № 1, 1947.
- Preston B. D., G. W. Ripley. An electron-microscopic investigation of the walls of Conifer cambium. *J. Exp. Bot.*, v. 5, № 15, 1954.
- Rändy B. G. and E. Ridi. Über den Feinbau der Zellulose. *Experientia*, v. 6, № 12, 1950.
- Rendle R. J. Gelatinous wood fibres. *Tropical Woods*, v. 52, № 11, 1937.
- Ribi E. Electron microscopic investigation of the cell wall organisation of wood. *Expl. Cell. Res.*, v. 5, № 1, 1953.
- Ritter G. J. Distribution of lignin in wood. *Ind. Eng. Chem.*, v. 17, 1925.
- Ritter G. Structure of the cell wall of wood fibers. *The Paper Industry*, June, 1934.
- Ritter G. Microstructure of wood and wood fibers. *Tappi, Tech. Sect.*, v. 32, 1949.
- Ritter G. J., R. Y. Mitchell. Crystal arrangement and swelling properties of fibers and ray cells in Basswood Holocellulose. *Paper Trade J.*, v. 9, № 6, 1939.
- Roelofs P. A. Orientation of cellulose fibriles in the cell wall of growing cotton hairs and its bearing on the physiology of cell wall growth. *Biochim., Biophys. Acta*, v. 7, № 43, 1951.
- Scott F. M., K. C. Hamner, E. Baker and E. Bowler. Electron microscope studies of cell wall growth in the onion root. *Am. J. Bot.*, v. 43, № 4, 1956.
- Stemsrud F. Über die Feinstruktur des Hoftüpfel Schliesshaut von Nadelhölzern. *Holzforschung*, Bd. 10, H. 3, 1956.
- Strassburger E. Über den Bau und das Wachstum der Zellhäute. *Yena*, 1882.
- Wardrop A. B. The intermicellar system in cellulose fibres. *Biochim. Biophys. Acta*, v. 13, № 2, 1954a.
- Wardrop A. B. Observations on crossed, lamellar structures in the cell walls of higher plants. *Austr. J. Bot.*, v. 2, № 9, 1954b.
- Wardrop A. B. The fine structure of the conifer tracheid. *Holz-forschung*, v. 8, № 1, 1954c.
- Wardrop A. B. The nature of reaction wood. V. The distribution and formation of tension wood in some species of *Eucalyptus*. *Austr. J. Bot.*, v. 4, № 2, 1956.
- Wardrop A. B. The Organization and Properties of the outer layer of the secondary Wall in conifer tracheids. *Holz-forschung*, v. 11, № 4, 1957.
- Wardrop A. B. The organization of the primary wall in differentiating conifer tracheids. *Aust. J. Bot.* v. 1, № 4, 1958.
- Wardrop A. B., H. E. Dadswell. The nature of reaction wood. II. The cell wall organization of compression wood, tracheids. *Austr. J. sci. Research, Ser. B*, v. 3, № 1, 1950.
- Wardrop A. B., H. E. Dadswell. The nature of reaction wood. III. Cell division and cell wall formation in conifer stems. *Austr. J. sci. Research, Ser. B*, v. 5, № 4, 1952a.
- Wardrop A. B., H. E. Dadswell. The cell wall structure of xylem parenchyma. *Austr. J. sci. Research, Ser. B*, v. 5, № 2, 1952b.
- Wardrop A. B., H. E. Dadswell. The development of the conifer tracheid. *Holz-forschung*, v. 7, № 2/3, 1953.
- Wardrop A. B. and H. E. Dadswell. The development of the conifer tracheid. *Holz-forschung*, v. 7, № 2/3, 1955.
- Wardrop A. B. and H. E. Dadswell. Variations in the Cell Wall organization of tracheids and fibres. *Holz-forschung*, v. 11, № 2, 1957.
- Wiesner Y. *Die Elementarstructur*. Wien, 1892.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРОЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРЕБЫВАНИЯ В ЗЕМЛЕ

В. Е. МОСКАЛЕВА

Известно, что древесина хвойных пород обладает долгой сохранностью и может находиться длительное время в земле без заметного нарушения ее строения и химического состава.

Имеющиеся в литературе данные по изучению остатков сосновой древесины указывают на увеличение содержания в ней смолистых веществ (Раковский, 1949). А. И. Скриган (1955), исследуя древесину сосны различного возраста, от месячного и годовичного до 150-тысячелетней давности, извлеченную из плотной массы погребных торфяников межледникового периода, нашел, что анатомическое строение древесины мало изменяется, химический состав меняется тоже крайне медленно. С увеличением возраста в древесине количество целлюлозы уменьшается и параллельно увеличивается количество негидролизуемого остатка, лигнина и нитро-лигнина. Количество водорастворимых и легко гидролизуемых полисахаридов с увеличением возраста постепенно падает, так же как и содержание редуцирующих веществ (сахаров).

В результате пребывания древесины сосновых пней в торфяных залежах в древесном комплексе идет процесс постепенной дегидратации. Больше всего происходят изменения в смолистых веществах древесины.

В. Е. Раковский и В. А. Высотская (1931), исследуя образцы сосны из сфагнового болота в Редкине возрастом 1000—2000 лет на глубине залегания 1 и 1.5 м, нашли, что не только лигнин, но даже целлюлоза и гемицеллюлозы претерпели очень незначительные изменения.

Е. В. Кондратьев и М. И. Костина (1958) исследовали образцы погребенной древесины сосны, № 1 и № 2, в возрасте 1300—2000 лет, находившиеся в различных условиях. Анализ образца сосны № 1, находившегося в сфагновом торфе, более устойчивом к биологическим разрушающим факторам, чем другие торфообразователи, обнаружил очень неглубокие изменения по главным компонентам — целлюлозе и негидролизуемому остатку, а также по количеству метоксила. Древесина же образца сосны № 2, находившегося в других условиях, претерпела значительные изменения в своем составе. Сложность процесса определяется, по мнению авторов, многими факторами, среди которых прежде всего — природа самого вещества и та внешняя среда, в которой происходило его разрушение.

С. М. Манская, М. С. Бардинская и М. Н. Кочнева (1951), исследуя ископаемую древесину, показали, что химический состав лигнина погребенной древесины не остается неизменным. Из разрушенной ископаемой древесины легко извлекаются ароматические альдегиды (ванилин). С. М. Манская (1957), говоря о биосинтезе и распаде лигнина, утверждает, что эти два противоположных биохимических процесса, характеризуются общими промежуточными соединениями и изучение одного невозможно без знания другого. Лигнин не остается неизменным в природных про-

цессах, но подвергается биологическому разрушению до более простых соединений. Последние могут участвовать в сложных реакциях вторичного синтеза, приводящих к образованию веществ нового типа.

Сен и Базак (Sen a. Basak, 1955) провели микроскопическое исследование образцов деградирующей древесины, полученных из раскопов в Голландии в мае 1940 г. Они пришли к заключению, что природа сохранности древесины зависит главным образом от внутренних свойств древесины и окружающих условий. У хвойных растений микроскопическая деградация слоев клеточной стенки располагается по степеням последовательности, как было установлено Баргхорном (Barghoorn, 1949). Образцы лиственной древесины, несмотря на более старший возраст, найдены почти свободными от деградации. Распределение лигнина такое же, как и в нормальной древесине. Пектиновые вещества также имеются. Исследование рентгеновыми лучами показало, что организация целлюлозной решетки различно сохраняется в различных образцах древней древесины из одних и тех же раскопов.

В своих работах Сен (Sen, 1956; Sen a. Basak, 1956) рассматривает тонкое строение древесины, пролежавшей длительное время в земле, а также поврежденной грибами. В очень древних волокнах и трахеидах, когда целлюлоза разрушена, оставшийся лигнин верно сохраняет характерную микроскопическую картину образцов даже после полного распада целлюлозы. Сумма целлюлозы в видимо деградировавшей древесине постепенно уменьшается, а следовательно, относительное количество лигнина увеличивается. Наблюдается грубая слоистость стенки, которая обычно соответствует ориентации разрушенной целлюлозы. Тонкая структура клеточной стенки в явно выраженных деградировавших образцах древесины обычно грубо разрушена, в хорошо сохранившихся — остается.

Исследование деградировавшей древесины в поляризованном свете показало, что часто слои клеточной стенки оптически неправильны, так как деградация целлюлозы проходит очень неравномерно в различных частях одной и той же ткани (Bailey a. Barghoorn, 1942).

Нам приходилось исследовать древесину сосны, погребенную в различных условиях. Так, исследования древесины сосны из раскопов Н. В. Андреева с о. Четырехстолбового из группы Медвежьих островов на Ледовитом океане показали большую сохранность этой древесины. Строение клеточной оболочки сохранялось полностью.

Несколько другие результаты получались при исследовании древесины сосны из раскопов свайного поселения Стрелка на глубине 1.5—2 м в районе р. Модлоны, Вологодская область. Изделия из этой древесины начала второго тысячелетия до нашей эры, представленные нам проф. А. Я. Брюсовым для определения породы древесины по ее анатомическому строению, показали другую картину сохранности, так же как и сосновые изделия из раскопок древнего Новгорода X—XV вв., производимых Новгородской археологической экспедицией Института материальной культуры АН СССР. В том и другом случае исследованные изделия находятся на различных стадиях деградации. У большинства образцов строение оболочек сохраняется полностью. В таких случаях, по-видимому, и химический состав не может дать различий между натуральной древесиной и погребенной в земле. Среди хорошо сохранившихся изделий встречались и образцы древесины, сильно деградировавшие. Стенки клеток сильно утончены, часть клеток заполнена темным содержимым. Поперечный срез такой древесины изображен на рис. 1. На рисунке видны разрывы тканей в отдельных местах. В деревянных изделиях мы встречали

различную степень деградации, независимо от того, где производились раскопки — на Крайнем Севере или в условиях древнего Новгорода.



Рис. 1. Поперечный срез древесины сосны из раскопок Дальнего Севера. Разрывы ткани и утончение клеточных стенок. Ув. 150.

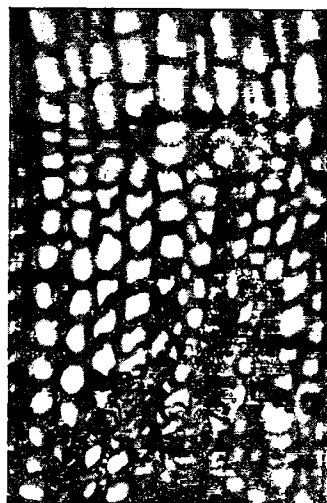


Рис. 2. Поперечный срез древесины сосны из раскопок древнего Новгорода. Начало деградации клеточных стенок. Ув. 175.

В основном изменение строения происходит во вторичных оболочках древесины. На рис. 2 изображен поперечный срез древесины сосны в начальной стадии деградации. В некоторых трахеидах, преимущественно поздних, вторичная оболочка сильно набухает и отделяется от первичной оболочки. Рис. 3 изображает поперечный срез древесины сосны, подвергшейся более сильной деградации. Здесь затронута уже не часть, а почти вся поздняя древесина годовичного слоя. Вторичная оболочка сосредоточивается в одном конце клетки и постепенно превращается в компактную темную массу. Рис. 4 дает картину того же явления в более увеличенном виде.

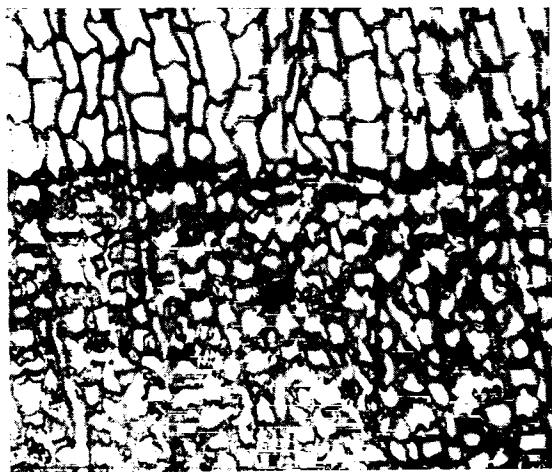


Рис. 3. Поперечный срез древесины сосны из раскопок Дальнего Севера. Деградация клеточных стенок. Ув. 175.

Темное содержимое, подобное тому, что наблюдается в конечном итоге деградации, мы наблюдали, исследуя хлорированную древесину сосны после ее обработки серной кислотой. По-видимому, с течением времени в древесине, долго пролежавшей в земле,

рированную древесину сосны после ее обработки серной кислотой. По-видимому, с течением времени в древесине, долго пролежавшей в земле,

происходят изменения, близкие к тем, какие наблюдаются при непосредственном действии кислот. В некоторых поздних трахеидах замечено начало деградации — отставание вторичной оболочки и превращение ее в бесформенную массу.

Мы наблюдали разную степень деградации оболочки на одном и том же изделии. Нарушение строения оболочек обычно начинается с края изделия и идет внутрь. С края сильно изменяется структура оболочки, внутри изделия трахеиды могут оставаться нетронутыми. Долго пролежавшая в земле древесина имеет обычно небольшие участки с заметным изменением строения, большая же ее часть остается неизменной. Поэтому



Рис. 4. Поперечный срез древесины сосны из раскопов Дальнего Севера. Деградация клеточных стенок. Ув. 320.

очевидно, что суммарный химический анализ не может дать большого различия состава нормальной древесины и древесины, длительное время входившей в землю. Химический состав изменяется заметно у такой древесины, в которой подверглось изменению большинство клеток.

На продольном срезе сильно деградировавшей древесины стенка трахеиды имеет часто вид мозаики с трещинками, идущими без всякой ориентации. Окаймленные поры сохраняют свою форму, однако замыкающая мембранка в них исчезает и отверстие несколько увеличивается.

Очень часто в древесине хвойных пород, пролежавшей длительное время в земле, наблюдается спиральная штриховатость. Что представляет собой эта видимая в обычном микроскопе штриховатость? Целлюлозные микрофибриллы во вторичной стенке трахеид хвойных часто собираются в агрегаты, видимые в микроскоп в виде штрихов, ориентированных под определенным углом к продольной оси трахеиды. Такую штриховатость наблюдал Бейли (Bailey, 1957) на продольных срезах свежесобранной, обработанной заболони сосны. У некоторых хвойных пород, например ественницы, такую штриховатость можно наблюдать в поздних трахеидах древесины тоже без всякой обработки. Обычно же для того, чтобы видеть спиральную штриховатость в трахеидах хвойных, следует принять кислотную или щелочную обработку, вызывающую набухание и частичное растворение клеточной стенки. Ориентация микрофибрилл, определяемая такой штриховатостью, варьирует в различных частях

отдельной трахеиды и в различных трахеидах того же самого дерева, в трахеидах различных деревьев одной породы, растущих в различных условиях, и в трахеидах различных видов и родов хвойных. Известно, что в различных частях вторичной оболочки ориентация микрофибрилл различна. Во внешнем и внутреннем слоях вторичной оболочки она близка к поперечной, в центральном же слое, составляющем основную массу вторичной оболочки, она ближе к параллельной. Такое строение вторичной оболочки исследовали многие ученые, применяя различные методы, как например гистохимический анализ, поляризованный свет, рентген, а в последнее время — электронный микроскоп (Бояркин, 1934, 1936;



Рис. 5. Мацерированный материал. Трахеида древесины сосны, обработанной серной кислотой. Спиральная штриховатость. Ув. 400.

Frey-Wyssling, 1936, 1951; Bailey a. Vestal, 1937; Bailey a. Berkley, 1942; Ritter, 1949; Hodge a. Wardrop, 1950; Preston, 1952; Esau, 1953; Preston a. Ripley, 1954; Wardrop, 1954; Bosshard, 1956; Emerton a. Goldmith 1956; Frey, Preston a. Ripley, 1957; Москалева, 1957; Одинцов, 1957б, и многие другие).

Обычно замеры угла ориентации микрофибрилл к продольной оси клетки производят в центральном слое и на основании этих замеров судят об угле наклона микрофибрилл всей клеточной стенки. То же происходит и при определении угла ориентации при помощи x -лучей. В этом случае определение производится суммарно, а так как центральный слой вторичной оболочки является в большинстве случаев преобладающей частью клеточной стенки, ориентация микрофибрилл в этой части играет большую роль при измерении.

Кроме большой изменчивости угла ориентации микрофибрилл к продольной оси даже в пределах одной клетки, необходимо помнить, что вторичная оболочка состоит из тонких пластинок, формирующих слой с различной ориентацией микрофибрилл в каждой так, что получение цифровой характеристики угла наклона микрофибрилл очень затруднено. Спиральная штриховатость, наблюдаемая нами на многих образцах древесины хвойных пород, пролежавших длительное время в земле, как мы раньше упоминали, очень напоминает штриховатость, полученную при обработке древесины щелочами и кислотами, вызывающими набухание и частичное растворение древесины.

На рис. 5 видна спиральная штриховатость в трахеидах древесины сосны, подвергнутой обработке серной кислотой в течение нескольких часов. П. Н. Одинцов (1957а), наблюдая набухание волокон в кислоте, пришел к выводу, что в начале набухания фибриллы тесно прилегают друг к другу и образуют небольшой угол с продольной осью волокна. С возрастанием набухания и связанным с ним укорочением волокна угол непрерывно возрастает. Если около цилиндрической части волокна угол острый, то дальше он становится прямым и даже тупым. Далее, он говорит о том, как при дальнейшей обработке в набухом в кислоте волокне наблюдается поперечная штриховатость. При более длительном воздействии кислоты штрихи углубляются и превращаются в очень глубокие поперечные трещины. Следующей стадией гидролитического воздействия является распад волокна на поперечные отрезки, что давало право многим исследова-

дователям предполагать существование поперечной структуры. Мы наблюдали распадение сильно набухшей в серной кислоте трахеиды на ряд отрезков, расположенных перпендикулярно к оси клетки (рис. 6). Следовательно, первой стадией растворения оболочки является обнаружение агрегатов микрофибрилл, идущих по спирали к продольной оси клетки, при последующем растворении ориентация меняется, приближаясь к поперечной относительно продольной оси клетки. Древесина, длительно находящаяся в земле, подвергается различным химическим воздействиям, которые медленно, но постоянно действуя на клеточную оболочку, постепенно разрушают ее, подобно быстро действующим химическим реагентам в лабораторных условиях.

Как уже сказано, при длительном действии серной кислоты обнаруживается поперечная ориентация микрофибрилл в клеточной оболочке. Исследуя сильно деградированную древесину из раскопов, мы обнаружили такую поперечную штриховатость в клеточных оболочках трахеид (рис. 7). Обычно такие участки с поперечной штриховатостью встречались в наружных частях изделий, более деградировавших, чем центральная часть. Если древесина взята из мест, где деградация только начинается, поперечной штриховатости не видно, заметна только спиральная штриховатость, характерная для трахеид, подвергавшихся несильной обработке серной кислотой. Наблюдения при помощи электронного микроскопа опровергли предположение некоторых исследователей о существовании поперечных структур. Распад волокна в поперечном направлении объясняется наличием рыхлых мест в молекулах целлюлозы, а также рыхлых плоскостей в макро- и микрофибриллах. В рыхлые места быстро проникают реактивы, вызывающие растворение аморфной целлюлозы, кристаллическая же часть остается малоизмененной (Одинцов, 1957а).

Кусочки древесины сосны, сильно деградировавшей, были подвергнуты нами мацерации по методу Шульце (азотная кислота с бертолетовой солью).

Трахеида, выделенная путем мацерации из деградировавшей древесины сосны (рис. 8), по своему строению очень напоминает первичную трахеиду ксилемы из почки сосны. Она имеет ясно выраженные нежные и тонкие спиральные утолщения, идущие в поперечном направлении к оси клетки.

Создается впечатление, что в результате химического воздействия благодаря длительному пребыванию древесины в земле обнажилась внутренняя основа клеточной оболочки, наиболее стойкая по отношению к растворителям. Известно, что наиболее стойки образовательные ткани. Так, при действии серной кислоты оболочки камбия не изменяют своего строения, тогда как зрелые трахеиды почти полностью растворяются (Москалева, 1957). Меристематическая ткань почки осины также противостоит различным растворителям (Москалева, 1956). При исследовании строения клеточной стенки в процессе ее образования можно видеть, что начальные стадии развития имеют ориентацию микрофибрилл, близкую



Рис. 6. Длительная обработка древесины сосны серной кислотой. Распадение трахеиды на отрезки, перпендикулярные к продольной оси клетки.

к поперечной. В первичной оболочке, по исследованию многих ученых, направление микрофибрилл также близко к поперечному. Центральный слой вторичной оболочки состоит из отдельных пластинок с различной ориентацией фибрилл. Преобладающей ориентацией микрофибрилл является спиральная, многократно измеренная многими исследователями. Третичный слой, или третичная оболочка, которую мы считаем частью клеточной стенки, не достигшей своего окончательного развития, имеет ориентацию микрофибрилл близкую к поперечной, как и первичная.



Рис. 7. Тангентальный срез древесины сосны из раскопов древнего Новгорода. Поперечная штриховатость трахеид.

Если развитие клеточной стенки не останавливается на данном этапе, а идет дальше, как это происходит во вторичной оболочке, протоплазма в дальнейшем откладывает микрофибриллы, имеющие спиральное направление. Это наблюдается, например, в креновой древесине хвойных пород, стенка трахеид которых, по наблюдениям некоторых исследователей, не имеет ярко выраженного третичного слоя с поперечным направлением микрофибрилл.

В креновой древесине клеточная стенка образуется очень быстро и она значительно более лигнифицирована, чем в нормальной древесине. Иначе обстоит дело в тяговой древесине лиственных пород. У них формирование клеточной стенки затягивается и ясно виден третичный слой, даже у вполне зрелой древесины, дающей реакцию на целлюлозу (окраска от хлор-цинк-иода в фиолетовый цвет). Ориентация микрофибрилл в этом слое близка к поперечной; различие между вторичной оболочкой и третичным слоем хорошо заметно в поляризованном свете. Благодаря этому третичный слой часто рассматривают как особую по своему составу и строению оболочку, обладающую иными свойствами, чем вторичная.

Усложненная схема строения клеточной стенки древесных растений может быть расшифрована только исследованием клеточной стенки в процессе ее развития. Благодаря химическим воздействиям (короткое время — в лаборатории, длительное — во время пребывания древесины в земле) происходит постепенное растворение сначала наиболее легко растворимых частей клеточной стенки. В результате получается спиральная штриховатость, в некоторых случаях незаметная без определенной обработки.

При дальнейших химических воздействиях (в лаборатории — в короткий срок, в земле — в более длительное время) идет постепенное растворение целлюлозы, деградация клеточной стенки и как бы обнажается ранее заложившаяся структура, выраженная через поперечную штриховатость. Структура эта наиболее устойчива как при химических, так и при механических воздействиях.

Эти первичные образования, кладущие основу всей далее развивающейся стенке клетки, во вторичной оболочке завуалированы позднее откладываемыми протоплазмой тяжами микрофибрилл, идущих по спирали. Даже при мацерации их нелегко обнаружить. Естественно также, что и электронный микроскоп здесь не в состоянии помочь без предварительной химической обработки. Только при химических воздействиях в лаборатории или в процессе медленного разложения в земле можно их обнаружить через поперечную штриховатость. При поражении грибами

эта первоначальная структура клеточной стенки является также наиболее устойчивой и может также быть обнажена на определенной стадии поражения грибами, как и при химических воздействиях. Возможно, что во время пребывания древесины в земле обнажение этой первоначальной структуры происходит в некоторых случаях в комплексе с действием грибного поражения. Вопрос этот требует специального исследования.

Известно, что разрушение при сжатии вдоль волокон определяют линии скольжения, идущие в поперечном направлении к оси клетки. При растяжении вдоль волокон волокна древесины рвутся, в основном в по-

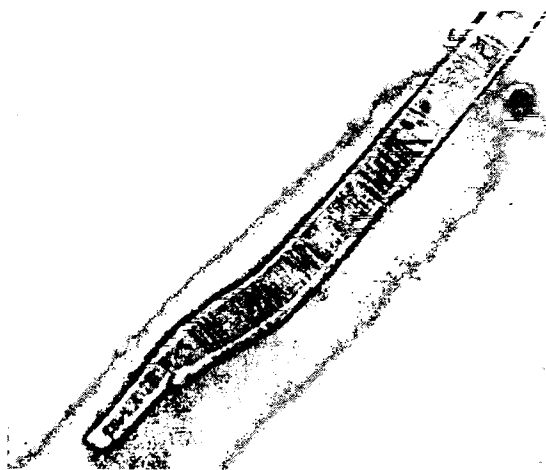


Рис. 8. Мацерированный материал, полученный из деградированной древесины сосны (раскопы древнего Новгорода). Трахеида с поперечной штриховатостью.

перечном направлении к оси волокна. При прессовании вдоль волокон образуются складки, идущие в поперечном направлении к оси волокна (Москалева, 1957). Очевидно, что вышеописанные первоначальные образования, наиболее устойчивые к действию химических агентов, в некоторых случаях определяют и характер разрушения при механических воздействиях.

Только детальное исследование деградировавшей древесины с учетом изучения строения клеточной стенки в процессе ее развития может уточнить наши представления в данной области.

Следует отметить, что при дальнейшей деградации поперечная штриховатость исчезает и стенки клетки приобретают бесструктурный вид; при очень сильной деградации она испещрена мелкими, беспорядочно расположенными трещинками.

Погребленную древесину сосны можно расположить по различным степеням деградации, взяв за основу различную степень деградации клеточной стенки. У хорошо сохранившейся древесины сосны спиральная штриховатость незаметна без особой обработки, клеточная стенка ничем не отличается от натуральной древесины. Первая степень деградации — спиральная штриховатость клеточной стенки, заметная без всякой обработки. Вторая степень деградации — появление поперечной штриховатости.

Третья и последняя степень деградации — беспорядочное растрескивание клеточной стенки в виде мозаики.

Вопросы, затронутые настоящей статьей, требуют более глубокого исследования, с привлечением различных пород древесины.

Выводы

1. Деградация древесины после длительного пребывания в земле зависит в основном не от глубины ее залегания, а от окружающих ее внешних условий, внутреннего строения и химического состава.

2. Деградация древесины происходит снаружи внутрь изделия; наряду с деградировавшими участками наблюдается цельная, нетронутая древесина.

3. В результате деградации у древесины сосны, пролежавшей длительное время в земле, как и в подвергавшейся обработке кислотами и другими растворителями целлюлозы, сначала появляется спиральная штриховатость клеточной стенки, затем поперечная и, наконец, при сильном растворении целлюлозы штриховатость исчезает и стенка покрывается беспорядочными трещинками в виде мозаики.

4. На поперечных срезах постепенную деградацию можно проследить, наблюдая за набуханием вторичной оболочки, отделением ее от первичной оболочки и постепенным растворением.

5. Поперечная ориентация микрофибрилл, встречающаяся в деградировавшей древесине сосны, длительно пролежавшей в земле, свойственна первоначальным образованиям клеточной стенки, обладающим большой устойчивостью против химических и механических воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

- Б о я р к и н А. П. Субмикроскопическая и микроскопическая структура растительных волокон. За новое волокно, № 5, 1934.
- Б о я р к и н А. П. Субмикроскопическая и микроскопическая структура текстильных волокон. Прилож. к переводу кн.: Детберн. Основы учения о структуре текстильных волокон. Излегрпром, М., 1936.
- И в а н о в Л. А. Анатомия растений. Гослестехиздат, 1939.
- К о н д р а т ь е в Е. В. и М. И. К о с т и н а. Исследование химического состава древесины, погребенной в торфяных залежах. Журн. прикл. химии АН СССР, т. XXX, 1958.
- М а н с к а я С. М. Биосинтез и распад лигнина. Усп. совр. биол., т. X, 1957.
- М а н с к а я С. М., М. С. Б а р д и н с к а я и М. Н. К о ч н е в а. Лигнин из лигнинов. ДАН СССР, т. XXXVI, № 5, 1951.
- М о с к а л е в а В. Е. О формировании древесных осины. Сб. работ по геобот., лесовед., палеогр. и флористике, посвящ. акад. В. Н. Сукачеву, Изд. АН СССР, 1956.
- М о с к а л е в а В. Е. Строение древесины и его изменение при физических и механических воздействиях. Изд. АН СССР, 1957.
- О д и н ц о в П. Н. Изменение формы волокон холоцеллюлозы при набухании в зависимости от биоструктуры. Тр. Инст. лесохоз. пробл. АН Латв. ССР, т. XII, Рига, 1957а.
- О д и н ц о в П. Н. Современные воззрения на строение целлюлозы и клеточной стенки растений. Тр. Инст. лесохоз. пробл. АН Латв. ССР, т. XII, Рига, 1957б.
- Р а к о в с к и й В. Е. Общая химическая технология торфа. М., 1949.
- Р а к о в с к и й В. Е., В. А. В ы с о т с к а я. Изменение состава древесины в торфяном болоте. Химия тверд. топлива, № 11—12, 1931.
- С к р и г а н А. И. О химическом составе древесины сосны тысячелетнего возраста. ДАН СССР, т. 100, № 6, 1955.
- V a i l e y J. W. Aggregations of microfibrils and their orientations in the secondary wall of coniferous tracheids. Am. J. Bot., v. 44, № 5, 1957.
- V a i l e y J. W. and E. S. B a r g h o o r n. Identification and physical condition of the stakes and wattles from the fishweirs. The Royston Striet Fishweirs. Pap. Peabody Found. Arch., v. 2, 1942.

- B a i l e y J. W. and E. E. B e r k l e y. The significance of x-rays in studying the orientation of cellulose in the secondary wall of tracheids. *Am. J. Bot.*, v. 29, 1942.
- B a i l e y J. W. and M. R. V e s t a l. The orientation of cellulose in the secondary wall of tracheary cells. *J. Arnold Arbor.*, v. 18, 1937.
- B a r g h o o r n E. S. Degradation of the plant remains in the organic sediments. *Bot. Mus. Leufl. Harvard Univ.* v. 14, 1949.
- B o s s h a r d H. H. Der Feinbau des Holzes als Grundlage technologischer Fragen. *Schweiz. Ztschr. f. Forstwesen*, v. 11, № 2, 1956.
- E m e r t o n H. W. and V. G o l d m i t h. The structure of the outer secondary wall of Pine tracheids from Kraft Pulp. *Holzforschung*, v. 103, H. 4, 1956.
- E s a u K. *The Plant Anatomy*. New York, 1953.
- F r e i E., R. D. P r e s t o n and G. W. R i p l e y. The fine structure of the wall of Conifer Tracheids. *J. Exp. Bot.*, v. 8, № 22, 1957.
- F r e y - W y s s l i n g A. Der Aufbau der Pflanzlicher Zellwände. *Protoplasma*, Bd. XXV, H. 2, 1936.
- F r e y - W y s s l i n g A. Über verbündete Cellulosemikrofibrillen in Zellwänden. *Holz als Roh- und Werkstoff*, H. 9, 1951.
- H o d g e A. Y. and A. B. W a r d r o p. An electron microscopic investigation of the cell wall organization of conifer tracheids and conifer cambium. *Ann. Z. Sci. Research.*, Ser. B, v. 3, № 3, 1950.
- P r e s t o n R. D. *The molecular architecture of plant cell walls*. London, 1952.
- P r e s t o n R. D. and G. W. R i p l e y. An electron microscopic investigation of the walls of Conifer cambium. *J. Exp. Bot.*, v. 5, № 15, 1954.
- R i t t e r G. J. Microstructure of wood and wood fibres. *Tappi, Tech. Sect.*, v. 32, 1949.
- S e n J. and R. K. B a s a k. The nature of ancient wood. II. The structure and properties of wall preserved tracheids and fibres. *Bull. of the Torrey bot. club*, v. 82, № 2, 1955.
- S e n J. Fine Structure in degraded ancient and buried wood and other fossilized plant derivatives. *Bot. Labor. Calcutta Univ.*, India, 1956.
- W a r d r o p A. B. The fine structure of the conifer tracheids. *Holzforschung*, Berlin, v. 8, № 1, 1954.
-

СТРОЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ И ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В СВЕТЕ СИММЕТРИИ ИХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В. А. БАЖЕНОВ

Введение

С открытием академиком А. В. Шубниковым (1946) пьезоэлектрических свойств в древесине и разработкой методики их количественного изучения в СССР (Баженов, Константинова, 1950; Баженов, 1953) и в Японии (Фукада, 1955) появилась возможность совершенно нового подхода к изучению субмикроскопического строения древесины, посредством исследования его связи с пьезоэлектрическим эффектом древесины. Эта возможность основывается на том, что наличие пьезоэлектрического эффекта в древесине указывает на «... принадлежность, если не самих древесных волокон, то во всяком случае каких-то составных их частей к одной из двадцати пьезоэлектрических групп кристаллографической симметрии» (Шубников, 1946, стр. 94).

Для реализации этой возможности устанавливался компонент древесины, ответственный за ее пьезоэлектрические свойства, находились его элементарные частицы с выявлением их симметрии и порядка ориентации в более крупные структурные отдельности (частицы). Критерием правильности соответствующих теоретических построений являлось объяснение симметрии пьезоэлектрических свойств нормальной и прессованной древесины, а также различных целлюлозных материалов, пьезоэлектрические свойства которых количественно исследовались после того, как удалось установить экспериментально, что пьезоэлектрические свойства древесины связаны с присутствием в ней целлюлозы (Баженов, Константинова, 1950).

Изучение наряду с древесиной других целлюлозных материалов как клеточного, так и неклеточного строения, с различной степенью и порядком ориентации их частиц, давало больший простор для поисков элементарных частиц и законов их «размножения» в пространстве на основе теории о пьезоэлектрических текстурах, разработанной А. В. Шубниковым (1946; Шубников и др., 1955).

Необходимость расширения объектов исследования вытекала из того факта, что в натуральной древесине в общем наблюдается только один тип ориентации клеток, варьирующий в сравнительно узких пределах.

Непосредственный подход к решению поставленных выше теоретических задач оказался практически возможным после накопления достаточно обширного и разнообразного экспериментального материала (Баженов, 1959).

Методика количественного исследования пьезоэлектрических свойств древесины

Изучение пьезоэлектричества в древесине, как и в других пьезоэлектрических материалах, требует знакомства с общей теорией пьезоэлектричества, излагаемой как в курсах физической кристаллографии (Wooster, 1938; Шубников, Флинт, Бокий, 1940), так и в специальных монографиях по пьезоэлектричеству (Шубников, 1946; Кеди, 1949; Мэзон, 1952, и др.). Основой для изучения пьезоэлектрических свойств древесины и других пьезоэлектриков, не принадлежащих к монокристаллам, является теория о пьезоэлектрических текстурах, разработанная Шубниковым (1946, 1955), которая представляет собой дальнейшее развитие общей теории пьезоэлектричества.

Количественное изучение пьезоэлектричества того или иного материала заключается в определении величин всех его пьезоэлектрических модулей. Пьезоэлектрические модули представляют собой коэффициенты пропорциональности, связывающие компоненты тензора упругих механических напряжений t_{ik} и вектора интенсивности поляризации J_j в системе трех линейных уравнений, обычно записываемых в форме таблицы тензора третьего ранга:

$$\begin{array}{cccccccccc}
 & t_{11} & t_{22} & t_{33} & t_{23} & t_{32} & t_{13} & t_{31} & t_{12} & t_{21} \\
 J_1 & d_{111} & d_{122} & d_{133} & d_{123} & d_{132} & d_{113} & d_{131} & d_{112} & d_{121} \\
 J_2 & d_{211} & d_{222} & d_{233} & d_{223} & d_{232} & d_{213} & d_{231} & d_{212} & d_{221} \\
 J_3 & d_{311} & d_{322} & d_{333} & d_{323} & d_{332} & d_{313} & d_{331} & d_{312} & d_{321}
 \end{array}$$

Интенсивность поляризации представляет собой вектор, величина которого равна плотности электрического заряда на поверхности диэлектрика, а направление определяется направлением смещения точечных положительных зарядов внутри поляризованного диэлектрика.

Учитывая доказываемые в теории упругости равенства $t_{ik} = t_{ki}$, тензору пьезоэлектрических модулей придают упрощенный вид:

$$\begin{array}{cccccc}
 & t_{11} & t_{22} & t_{33} & t_{23} & t_{31} & t_{12} \\
 J_1 & d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\
 J_2 & d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\
 J_3 & d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36}
 \end{array}$$

Отметим разницу в индексах пьезоэлектрических модулей в первом и втором случаях. В первом случае индекс трехзначный и состоит из индекса интенсивности поляризации (на первом месте) и индекса механического напряжения. Во втором случае двузначный индекс состоит из индекса строки (на первом месте) и индекса столбца (на втором месте).

Из сопоставления уравнений обеих таблиц следует, что модули, стоящие под соответствующими нормальными напряжениями в одинаковых строках, в обоих случаях равны ($d_{111} = d_{11}$; $d_{211} = d_{21}$ и т. д.). Для модулей же, стоящих под касательными напряжениями (t_{23} , t_{31} , t_{12}), получаются следующие очевидные соотношения:

$$d_{14} = d_{123} + d_{132}, \quad d_{25} = d_{231} + d_{213} \text{ и т. д.}$$

Приведенная форма сокращенного пьезоэлектрического тензора, содержащего все 18 пьезоэлектрических модулей, возможна в асимметричных диэлектриках, группа симметрии которых обозначается единицей.

В диэлектриках, принадлежащих к другим группам симметрии, некоторые модули обращаются в нуль. Существует 16 форм пьезоэлектрических тензоров для 20 пьезоэлектрических групп симметрии. Количество форм тензоров меньше числа групп пьезоэлектрической симметрии,

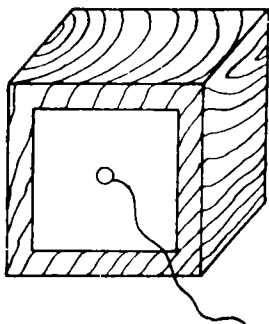


Рис. 1. Пьезоэлектрические элементы, работающие при сжатии.

поскольку некоторые тензоры являются общими для некоторых групп (подчиненные группы). Задачу количественного исследования пьезоэлектрика можно считать решенной, когда для него найдена форма тензора пьезоэлектрических модулей в главной системе координат и определены величины входящих в тензор модулей.

Главным в технике экспериментального изучения пьезоэлектрического эффекта является изготовление пьезоэлектрических элементов и создание рациональных установок для их испытания. Пьезоэлектрическим элементом называется образец из пьезоэлектрика, предназначенный для получения пьезоэлектрического эффекта. Конструкция пьезоэлектрического элемента должна способствовать наиболее удобному получению данных для вычисления пьезоэлектрических модулей, входящих

в соответствующий тензор, в главной системе координат.

Применявшаяся нами методика для исследования пьезоэлектрических свойств древесины подробно описана в нашей статье (Баженов, 1953), а еще более подробно в монографии (Баженов, 1959). Здесь мы ограничимся приведением лишь самых общих положений и некоторых дополнений.

Нами применялись работающие при сжатии пьезоэлектрические элементы, в форме куба с длиной ребра 2, 2.5 и 3 см, снабженные некрашенными аквадаговыми электродами (рис. 1). Для описания пьезоэлектрических свойств древесины использовалась главная система координат, определенная тремя главными структурными направлениями, как указано на рис. 2. Ребра пьезоэлектрических элементов совмещались с направлениями осей штрихованной (новой) системы координат. Соотношения между осями обеих систем определялись тензорными преобразованиями, обеспечивавшими возможность определения искоемых пьезоэлектрических модулей.

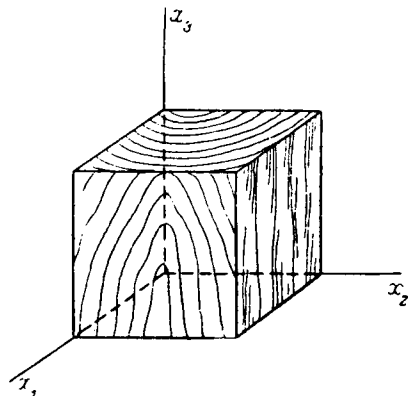


Рис. 2. Главная система координат, определенная тремя структурными направлениями, в небольшом куске древесины.

На рис. 3 показаны соотношения между осями координат обеих систем, при которых оси штрихованной системы определяют конструкции пьезоэлектрических элементов для вычисления пьезоэлектрических модулей — d_{14} и d_{25} по формулам:

$$d_{25} = -\frac{2J_2}{i'_{11}}, \quad d_{25} = \frac{2J_2}{i'_{33}},$$

$$d_{14} = -\frac{2J_1}{i'_{22}}, \quad d_{14} = -\frac{2J_1}{i'_{33}},$$

где J_2 и J_1 — компоненты интенсивности поляризации, равные плотности электрического заряда на площадках соответственно радиальной и тангенциальной поверхности, перекрытых электродами (рис. 3), в абсолютных электрических единицах; t'_{11} , t'_{22} и d'_{33} — нормальные механические напряжения в штрихованной системе координат, в дин./см².

Испытание указанных радиальных и тангенциальных пьезоэлектрических элементов в статическом режиме по методике, изложенной ранее (Баженов, 1953 и 1959), обеспечивало определение пьезоэлектрических модулей с предельной относительной ошибкой $\pm 6.5\%$.

Пьезоэлектрические элементы одновременно служили образцами для определения объемного веса в абсолютно сухом состоянии (до окрашивания электродов), числа годовых слоев в 1 см, процента поздней древесины и модулей полной деформации E_r и E_t . Эти модули условно принимались за модули нормальной упругости в штрихованной системе координат, а именно: $E_r = E'_{11}$ и $E_t = E'_{22}$, поскольку они определялись из прямолинейных участков диаграмм сжатия пьезоэлектрических элементов. E_r и E_t определялись в 10^{10} дин./см² с предельной относительной ошибкой 4.90%.

Заметим, что модули упругости E'_{11} и E'_{22} посредством тензорных преобразований выражаются (Баженов, 1959) через компоненты модулей упругости древесины в главной системе координат по формулам:

$$E'_{11} = \frac{4}{\frac{1}{E_r} + \frac{1}{E_a} + \frac{1}{G_{ar}} - \frac{2\mu_{ar}}{E_r}},$$

$$E'_{22} = \frac{4}{\frac{1}{E_t} + \frac{1}{E_a} + \frac{2}{G_{ta}} - \frac{2\mu_{at}}{E_t}},$$

где E_a , E_r , E_t — модули нормальной упругости соответственно в продольном, радиальном и тангенциальном направлениях; G_{ar} и G_{ta} — модули сдвига при радиальном и тангенциальном скалывании; μ_{ar} и μ_{at} — коэффициенты поперечных деформаций.

При изготовлении пьезоэлектрических элементов средовые доски кряжей разрезались на рейки, нумерованные от периферии к сердцевине. Из каждой рейки вырезалась группа сравнительно однородных пьезоэлектрических элементов. Такой порядок одновременно позволял проследить за изменчивостью свойств древесины по радиусу ствола.

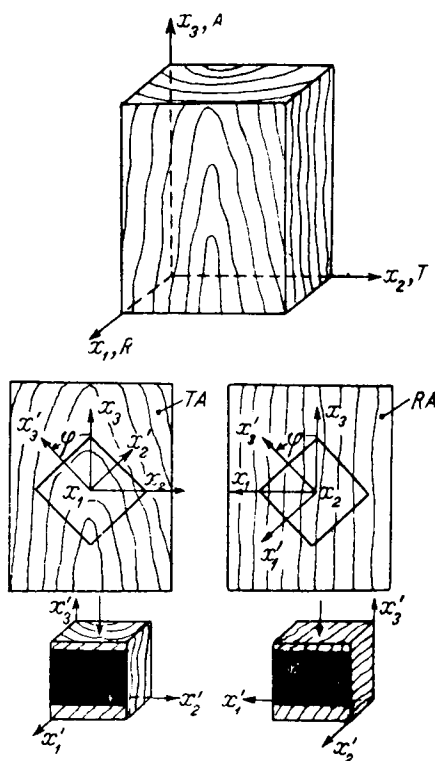


Рис. 3. Схема вырезки радиальных (справа) и тангенциальных (слева) пьезоэлектрических элементов.

Рассмотрение результатов исследования пьезоэлектрических свойств древесины и их связей с другими ее свойствами

В табл. 1 представлены сводные данные результатов испытания свыше 1100 пьезоэлектрических элементов, изготовленных из древесины представителей кольцесосудистых (дуб, ясень), рассеянососудистых (бук, береза, осина) и хвойных пород (сосна).

В каждой строке содержатся средние значения результатов испытания групп образцов, вырезанных из одинаковых реек, с указанием числа образцов в каждой группе (n). В колонках таблицы перечислены наименования свойств, отдельно для радиальных и тангентальных пьезоэлектрических элементов, а также отношения абсолютных значений пьезоэлектрических модулей — d_{14} и d_{25} , модулей полной деформации и их произведений. В последней колонке приведена нумерация реек, показывающая их положение в отдельных кряжах по радиусу ствола от периферии к сердцевине.

В табл. 2 приводятся вариационные коэффициенты пьезоэлектрических модулей, объемного веса и отчасти модулей полной деформации для отдельных групп образцов, некоторых кряжей и породы в целом (дуб), представленной несколькими кряжами. Эти коэффициенты, характеризующие изменчивость свойств, естественно, меньше для отдельных групп, больше для кряжей и еще больше для породы в целом (по данным испытания нескольких кряжей). Полученные вариационные коэффициенты не превышают по своей величине коэффициентов изменчивости ряда механических и физических свойств, приводимых в ГОСТе 6336—52, а по объемному весу наши данные почти совпадают с данными этого ГОСТа.

У всех исследованных пород древесины экспериментально обнаружено только два значительных по величине пьезоэлектрических модуля — d_{14} и d_{25} , причем одноименные модули у различных пород различаются по величине, а в пределах каждой породы существенно варьируют под влиянием ряда рассматриваемых далее факторов, определяющих неоднородность древесины.

Принципиальное значение имеет вопрос о соотношении абсолютных величин пьезоэлектрических модулей — d_{14} и d_{25} , поскольку этим соотношением в данном случае определяется группа симметрии пьезоэлектрических свойств древесины. Сравнение модулей возможно в пределах строк, поскольку в них представлены элементы из приблизительно одинаковой древесины.

В 10 группах табл. 1 (строки 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 24, 39) можно считать, что в пределах точности измерений $|d_{14}| = |d_{25}|$. Это равенство требуется по теории для пьезоэлектрических текстур группы симметрии $\infty : 2$. В остальных 25 сравнимых группах образцов нормальной древесины наблюдается неравенство $|d_{14}| > |d_{25}|$.

И, наконец, в 5 группах прессованной в радиальном направлении осины (строки 34—38) обнаружены противоположные неравенства $|d_{14}| < |d_{25}|$.

Проверка неравенств $|d_{14}| > |d_{25}|$ по образцам групп 5, 25, 26, 32 и 47 подтвердила их полную статистическую достоверность. Эта проверка проводилась по известной формуле:

$$\frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}} \geq 3 \pm \frac{6}{n-4},$$

где M_1 и M_2 — средние арифметические; m_1 и m_2 — их средние ошибки; n — число наблюдений.

В табл. 1 и 2 содержатся все данные для применения этой формулы и к любой другой группе образцов.

Неравенства $|d_{14}| > |d_{25}|$ в нормальной древесине и $|d_{14}| < |d_{25}|$ в радиально прессованной, как известно из теории пьезоэлектричества, не совместимы с группой симметрии $\infty : 2$, но возможны в группе $2 : 2$, которая, исходя из макроскопического строения древесины (рис. 2), казалась бы для древесины вполне естественной. Однако экспериментальными исследованиями пьезоэлектрический модуль d_{36} в нормальной древесине сначала не обнаруживался (Баженов, 1953; Fukada, 1955). Но в прессованной древесине этот модуль обнаруживается четко. Установлено, что в березе, спрессованной в радиальном направлении (вдоль оси x_1 на рис. 2) по способу ЦНИИЛХИ до объемного веса 0.91 г/см^3 , имеется пьезоэлектрический модуль d_{36} , изменяющийся в пределах от $-0.045 \cdot 10^{-8}$ до $0.126 \cdot 10^{-8}$ и в среднем равный $-0.100 \cdot 10^{-8}$ абс. единиц. Для полноты картины нами была испытана и тангенциально прессованная (в направлении оси x_2 на рис. 2) береза (образцы были любезно приготовлены Н. Т. Песенко). В образцах из этой березы неизменно обнаруживался пьезоэлектрический модуль d_{36} , но в отличие от первого случая — с положительным, т. е. обратным, знаком.

Наличие пьезоэлектрического модуля d_{36} у прессованной древесины побудило нас к повторной попытке определить этот модуль в нормальной древесине. Для этого была применена несколько измененная методика, более точная.

Если для определения пьезоэлектрического модуля d_{14} на тангенциальной поверхности (рис. 3) намечался контур тангенциального пьезоэлектрического элемента и для определения пьезоэлектрического модуля d_{25} на радиальной поверхности намечался контур радиального пьезоэлектрического элемента (рис. 3), то для определения пьезоэлектрического модуля d_{36} аналогичную разметку следует сделать на торцовой поверхности (рис. 4), а пьезоэлектрический элемент при этом целесообразно назвать торцовым.

Как известно (Баженов, 1959), для определения пьезоэлектрического модуля d_{36} можно воспользоваться одной из формул:

$$d_{36} = \frac{2J_3}{t'_{11}}, \quad d_{36} = -\frac{2J_3}{t'_{22}},$$

где J_3 — компонента интенсивности поляризации, равная плотности электрического заряда на торцовой поверхности, в абсолютных электрических единицах; t'_{11} и t'_{22} — нормальные механические напряжения в штрихованной системе координат, в дин./см².

Торцовые пьезоэлектрические элементы, работающие на сжатие, испытывались с помощью испытательной машины ГЗИП при наличии на ее площадке тарированного динамометра. При этих условиях, непосредственно воздействуя на маятник машины, удавалось измерять быстро прикладываемые и снимаемые механические нагрузки в 50—150 кг. Электрическое напряжение измерялось электрометром при чувствительности 20 делений на вольт и выше, а емкость — мостиком.

Результаты предварительных испытаний приводятся в табл. 3.

Модуль d_{36} для всех исследованных пород имеет положительный знак. Таким образом, в древесине, в зависимости от морфологической симметрии исследуемого образца, изменяющейся вдоль радиуса ствола, возможны группы симметрии пьезоэлектрических свойств $\infty : 2$, $2 : 2$, а также,

Таблица 1

Сводные данные о пьезоэлектрическом эффекте радиальных и тангенциальных пьезоэлектрических элементов с характеристикой их древесины

№ группы образцов	Радиальные пьезоэлектрические элементы						Тангенциальные пьезоэлектрические элементы						$\frac{d_{14}}{d_{25}}$	$\frac{d_E(14)}{d_E(25)}$	$\frac{E_t}{E_r}$	Положение реж по радиусу ствола
	n	$d_{25} \times 10^8$	γ_0	поздняя древесина, %	E_r	$d_E(25)$	n	$-d_{14} \times 10^8$	γ_0	поздняя древесина, %	E_t	$d_E(14)$				
Д у б																
1	7	0.311	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	4	0.301	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	9	0.254	—	—	—	—	5	0.534	—	—	—	—	2.10	—	—	—
4	6	0.270	—	—	—	—	3	0.414	—	—	—	—	1.53	—	—	—
5	10	0.457	0.695	—	1.52	72	9	0.588	0.679	—	0.99	58.1	1.28	0.81	0.65	—
6	18	0.156	0.560	57.6	1.74	27.1	22	0.207	0.535	52.5	1.005	20.7	1.33	0.77	0.57	1
7	20	0.274	0.620	63.7	1.68	46.0	19	0.323	0.618	62.0	1.175	38.0	1.18	0.83	0.68	2
8	14	0.226	0.643	77.8	2.24	50.6	6	0.246	0.633	74.1	1.64	40.3	1.09	0.80	0.73	1
9	17	0.223	0.672	85.3	2.58	57.5	13	0.217	0.666	34.3	1.81	39.4	0.97	0.69	0.72	2
10	17	0.223	0.672	85.3	2.58	57.5	8	0.228	0.671	79.5	1.54	35.1	1.02	0.61	0.61	2
11	13	0.225	0.668	81.0	2.61	58.8	11	0.212	0.674	83.5	1.81	38.4	0.94	0.65	0.69	3
12	13	0.225	0.668	81.0	2.61	58.8	10	0.216	0.678	80.8	1.97	42.5	0.96	0.72	0.75	3
13	11	0.193	0.666	85.0	2.37	45.8	14	0.199	0.732	81.6	1.86	37.1	1.03	0.81	0.78	4
14	11	0.193	0.666	85.0	2.37	45.8	9	0.199	0.730	77.3	2.35	46.8	1.03	1.02	0.99	4
15	13	0.234	0.715	77.6	2.46	57.5	10	0.233	0.719	77.6	2.02	47.1	1.00	0.82	0.82	5
16	13	0.234	0.715	77.6	2.46	57.7	10	0.218	0.718	75.6	2.03	44.3	0.93	0.77	0.83	5
17	11	0.231	0.720	78.9	2.36	54.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6
18	9	0.314	0.562	52.7	2.22	69.5	19	0.354	0.578	50.2	1.42	50.5	1.13	0.73	0.64	1
19	10	0.293	0.622	63.3	2.33	68.3	18	0.390	0.650	58.8	1.57	61.3	1.33	0.90	0.67	2
20	10	0.310	0.667	65.7	2.36	73.2	17	0.364	0.653	55.7	1.56	56.8	1.17	0.78	0.66	3
21	10	0.298	0.670	61.6	2.26	67.5	18	0.398	0.665	63.5	1.85	73.7	1.35	1.09	0.82	4
22	9	0.334	0.660	63.5	2.18	73.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5
Я с е н ь																
23	10	0.288	0.642	64.5	1.88	54.1	12	0.375	0.647	58.7	1.84	69.0	1.30	1.27	0.98	1
24	10	0.340	0.631	61.9	1.99	67.7	10	0.356	0.654	63.5	1.75	62.3	1.04	0.92	0.88	2

25	10	0.256	0.528	—	1.74	44.6
26	8	0.434	0.615	—	2.8	121.6
27	23	0.437	0.629	—	1.18	51.6
28	19	0.299	0.560	—	0.86	25.7
29	14	0.348	0.544	—	0.83	28.3
30	18	0.376	0.544	—	0.99	37.2
31	16	0.323	0.537	—	1.21	39.1
32	9	0.36	0.393	—	1.11	40.0
33	35	0.348	0.449	—	0.87	29.4
34	4	0.500	0.628	—	0.602	30.1
35	4	0.512	0.630	—	0.400	20.5
36	4	0.740	0.890	—	0.770	57.2
37	4	0.667	0.988	—	0.89	59.0
38	4	0.642	1.065	—	1.015	65.2
39	27	0.609	0.514	41.2	0.805	49.0
40	23	0.513	0.523	39.7	0.853	43.7
41	25	0.424	0.524	36.8	1.149	48.6
42	24	0.367	0.457	27.8	0.907	33.2
43	24	0.368	0.468	30.8	0.594	21.8
44	13	0.448	0.456	30.5	1.45	65.0
45	14	0.498	0.510	35.0	0.905	45.0
46	—	—	—	—	—	—
47	10	0.530	0.529	—	—	—
48	13	0.405	0.440	28.9	0.71	28.0

Таблица 2

Вариационные коэффициенты пьезоэлектрических модулей, объемного веса и модулей полной деформации древесины сосны, березы, осины и дуба

№ группы образцов по табл. 1	Радиальные пьезоэлектрические элементы			Тангенциальные пьезоэлектрические элементы		
	d_{25}	γ_0	E_r	$-d_{11}$	γ_0	E_t
С о с н а						
39	10.2	2.3	16.3	6.8	3.0	12.6
40	7.4	2.5	10.0	11.3	5.2	16.0
41	10.6	4.6	17.0	12.4	2.9	12.1
42	10.9	2.8	16.0	14.9	3.0	15.8
43	16.9	8.5	20.4	10.3	2.9	19.2
44	18.8	1.9	45.0	14.8	5.9	17.3
45	10.8	2.4	22.3	8.1	2.4	12.5
46	—	—	—	14.4	1.9	21.6
47	12.5	4.4	55.3	6.8	1.3	34.0
48	16.6	5.5	13.2	—	—	—
Общие по сосне . .	22.2	7.8	28.6	16.1	5.7	42.5
Б е р е з а						
27	14.6	6.2	18.3	13.3	1.6	13.2
28	22.8	26.8	12.1	9.8	3.5	16.9
29	17.3	6.1	31.8	9.3	3.8	12.6
30	12.5	1.8	14.5	10.3	3.9	15.3
31	9.3	4.7	18.3	—	—	—
Общие по березе	19.8	7.9	23.3	15.4	8.8	24.1
О с и н а						
33	12.6	5.5	20.2	—	—	—
Д у б						
5	8.1	3.3	—	7.7	2.6	—
6—7	37.3	6.9	—	29.1	8.5	—
8—17	20.6	4.7	—	19.9	4.9	—
18—22	16.4	6.9	—	11.8	5.5	—
Общие подубу . .	32.0	8.1	—	24.8	9.0	—

очевидно, 1 : 2 и 1. Но при всех условиях значительных по величине имеется только два пьезоэлектрических модуля: $-d_{11}$ и d_{25} ; модуль d_{36} очень мал, а остальные модули ничтожны, и существование последних может допускаться лишь в порядке теоретического предположения, исходя из соображений симметрии.

Как показали исследования (Баженов, 1953, 1956, 1957, 1959), пьезоэлектрические модули $-d_{11}$ и d_{25} в качестве характеристик пьезоэлектрического эффекта древесины не совсем удобны, поскольку они зависят от модулей упругости соответствующих пьезоэлектрических элементов и объемного веса древесины. Эти зависимости маскируют и искажают

основную роль ориентации целлюлозного компонента древесины, ответственного за ее пьезоэлектрические свойства.

Для возможности использования пьезоэлектрического эффекта в качестве косвенной количественной характеристики степени ориентации были введены (Баженов, 1959) критерии пьезоэлектрического эффекта, определяемые по следующим формулам:

$$K_r^o = \frac{d_{25} E_r}{\gamma_0} \text{ и } K_t^o = \frac{|d_{14}| E_t}{\gamma_0},$$

Таблица 3

Предварительные данные о пьезоэлектрическом эффекте торцовых пьезоэлектрических элементов некоторых пород

Порода	Значения пьезоэлектрического модуля $d_{36} \times 10^9$ абс. эд.		
	среднее	минимальное	максимальное
Сосна	0.50	0.01	1.05
Бук	0.47	0.00	0.94
Береза	0.25	0.00	0.37
Ясень	0.76	—	—
Самшит	0.41	0.29	0.56
Дуб	0.56	—	—

где K_r^o и K_t^o — критерии; d_{25} и d_{14} — пьезоэлектрические модули; E_r и E_t — модули Юнга радиальных и тангенциальных пьезоэлектрических элементов (модули полной деформации).

В табл. 4 представлены эти критерии, подсчитанные для древесины различных пород. Широкий диапазон изменчивости критериев не может быть объяснен изменчивостью химического состава древесины, относительно стабильного. Причиной колебаний K_r^o и K_t^o могут быть колебания в степени ориентации целлюлозы.

Следует указать на отмечавшиеся факты практического отсутствия пьезоэлектрического эффекта в древесине фисташки и бакаута (Баженов, 1953), несмотря на то, что они содержат целлюлозы не так уж мало.

Для объяснения пьезоэлектрических свойств древесины, сложных в своих проявлениях, потребовалось создание теоретических построений, объясняющих все факты с единых позиций теории пьезоэлектрических текстур А. В. Шубникова. Для того чтобы увереннее подойти к этим построениям, было предпринято изучение как волокнистых, так и неволокнистых целлюлозных материалов.

Изучение пьезоэлектрических свойств целлюлозных материалов

Описанию методики и результатов исследования необходимо предположить конспективное изложение ряда положений, относящихся к строению

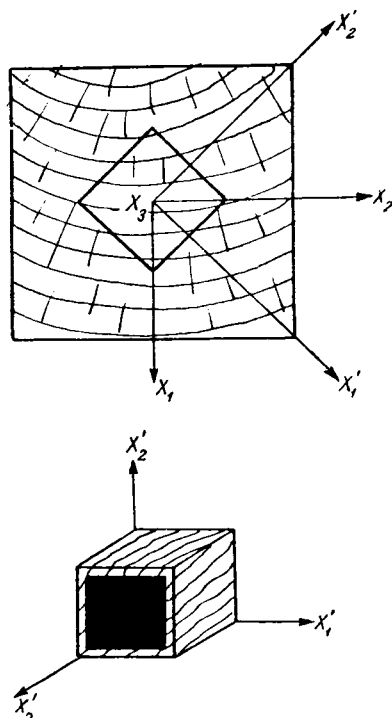


Рис. 4. Схема вырезки торцовых пьезоэлектрических элементов, используемых для определения пьезоэлектрического модуля d_{36} .

целлюлозы и существенных для ее рассмотрения как пьезоэлектрической текстуры.

Молекула целлюлозы в настоящее время представляется состоящей из множества β -*d* глюкозных остатков, соединенных между 1 и 4 углеро-

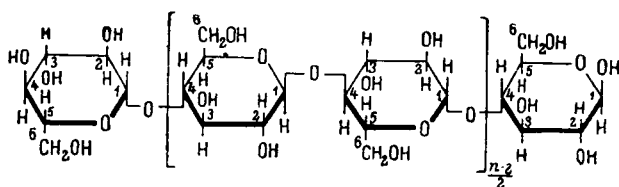


Рис. 5. Строение макромолекулы целлюлозы.

дами глюкозидными связями (рис. 5). Пространственная модель глюкозного остатка представляется асимметричной (рис. 6). В вытянутой молекуле остатки повторяются винтовой осью симметрии второго порядка. Молекула целлюлозы полярна. Она, по существующим предположениям,

изогнутая, однако характер и степень изогнутости молекулы не представляются вполне ясными.

Вопрос о надмолекулярном строении целлюлозы также дискуссионный.

Целлюлоза со своими спутниками в древесине находится в мало изменяющихся количественных соотношениях. Характер связи целлюлозы с ее спутниками до сих пор еще остается предметом дискуссии.

Касаясь строения и свойств спутников целлюлозы, необходимо подчеркнуть теоретическую возможность пьезоэлектричества в ориентированных гемицеллюлозах,

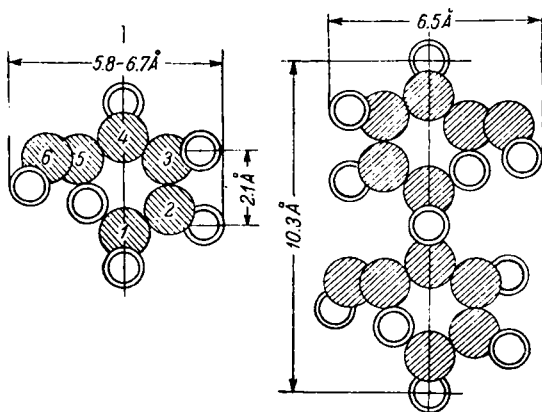


Рис. 6. Глюкозный и целлюбиозный остатки в «рациональном» изображении.

Углеродные атомы показаны заштрихованными кружками, кислородные — светлыми кружками. Водородные атомы не показаны.

поскольку их мономеры являются пьезоэлектриками (Копчик, 1956).

Для изучения пьезоэлектричества целлофана, целлюлоида, нитей вискозного шелка (склеенных в пластинки) древесной и хлопковой целлюлозы применялась специальная установка (рис. 7). В ней образец (*a*) в виде пластинки или пленки помещался на заземленную металлическую плиту (*b*) и с одного конца прижимался к ней планкой (*в*) с помощью шурупов (*г*). К другому его концу прикреплялся зажим (*д*), соединенный шнуром (*ж*), перекинутым через блок (*е*) с чашкой для груза (*з*). Сверху на образец укладывался стальной шлифованный брусок (*и*) — как второй электрод, который соединялся с нитью электрометра.

При испытании этой установки особое внимание было обращено на возможность возникновения зарядов вследствие поверхностного трения, что в данных условиях могло бы явиться существенной помехой для наблюдения и измерения пьезоэлектрического эффекта текстуры. Эта воз-

Таблица 4

Средние значения и пределы изменений K_T^p и K_t^p для древесины разных пород

Порода	K_T^p			K_t^p		
	среднее значение	минимальное значение	максимальное значение	среднее значение	минимальное значение	максимальное значение
Дуб	78.0	48.5	103.5	60	39	85.6
Ясень	95.7	84.5	107.1	100.5	95.4	106.5
Бук	84.5	—	—	71.4	—	—
Береза	86.7	46.0	198.0	70.5	42.7	109.5
Осина	83.5	65.6	102.0	77.5	—	—
Осина прессованная	59.2	48.0	64.0	60.0	52.5	80.2
Сосна	86.0	46.6	142.5	96.3	84.0	127.0

можность была отвергнута после исследования образцов из текстуры, вырезанных таким образом, чтобы пьезоэлектрический эффект в них при прочих равных условиях не возбуждался и не мешал наблюдению электризации от трения, если бы она возникла. Непосредственный опыт показал, что при правильной установке образца и при отсутствии у него нераспрямляемого натяжением коробления электризация от трения отсутствует.

В препаратах из волокнистой целлюлозы частицей текстуры, как и в древесине, является клетка, в чем легко убедиться простым микроскопическим исследованием листовой целлюлозы, различных бумаг и прочих препаратов. Конечно, из этих клеток удалены лигнин и некоторые другие компоненты, стенки их нарушены размалывающей аппаратурой, но целлюлоза в основном сохраняет свое волокнистое строение.

Препараты, полученные из целлюлозы с беспорядочным расположением клеток, не давали пьезоэлектрического эффекта. Препараты же с приблизительно параллельным расположением продольных осей клеток обнаруживали свойства пьезоэлектрической текстуры $\infty : 2$, при одностороннем прессовании переходящей в текстуру $2 : 2$. Указанная ориентация клеток достигалась специальным приготовлением целлюлозы. Для этого из прямослойной сосновой рейки была приготовлена щепка примерно следующих размеров: длина 10 см, поперечное сечение 0.3×0.3 см. Щепку не очень плотно набивали в жаростойкие керамические трубки с поперечной перфорацией, которые затем были обтянуты чехлами из железной проволочной сетки. Варка производилась по сульфатному способу в массивных патронах в масляной бане с газовым подогревом. Во время варки патроны непрерывно вращались с мощностью механического мотвила. Активная щелочь загрузжалась из расчета 18% к абсолютно сухому весу дре-

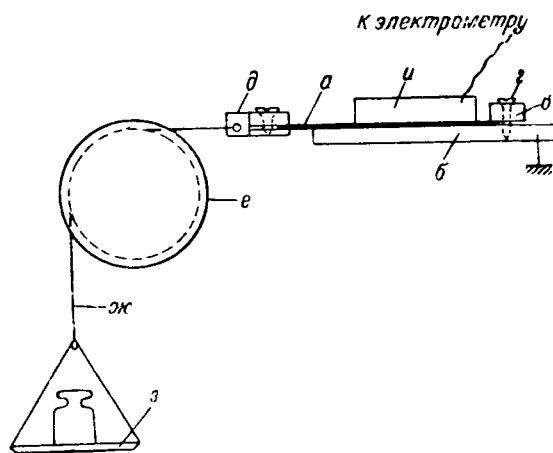


Рис. 7. Схема установки для испытания пьезоэлектрических элементов, работающих на растяжение.

весины, модуль $1/5$. Заварка до 170° производилась 3 часа. Варка при температуре 170° продолжалась 3 часа 40 минут.

После тщательной промывки образцов до полного исчезновения следов щелочи получившиеся очень мягкие волокнистые пучки параллельно и равномерно распределялись по площади латунной сетки, накрывались сверху второй такой же сеткой и спрессовывались в пластинку в прессе с обогреваемыми плитами. Пьезоэлементы из таких пластинок обнаруживали весьма значительный пьезоэлектрический эффект (табл. 5). Однако незначительный пьезоэлектрический эффект четко наблюдался и в образцах обычной бумаги и картона, полученных на бумажных машинах (табл. 5). Этому обстоятельству не следует удивляться, поскольку в процессе непрерывного формирования бумажного листа создаются условия для несколько большей укладки волокон по движению листа, чем по другим направлениям.

Опыты с волокнистой целлюлозой показали решающую роль ориентации клеток в препаратах и позволили рассматривать клетку как частицу, принадлежащую к одной из групп пьезоэлектрической симметрии.

Поскольку из опытов была установлена симметрия пьезоэлектрической текстуры $\infty : 2$ и выяснен закон ориентации образующих эту текстуру частиц, в виде клеток, диапазон поисков группы симметрии для клетки оказался в довольно узкой вилке. Согласно теореме IV А. В. Шубникова (1946, стр. 26), текстура $\infty : 2$ получается вращением частицы вокруг крутильной оси любого порядка. Отсюда следует, что группа симметрии для клетки может принадлежать к группам симметрии, имеющим перпендикулярную (к продольной оси) ось симметрии второго порядка, например $2 : 2$, $3 : 2$, $\infty : 2$. Окончательный выбор группы возможен при анализе строения клеток. Принципиальное значение имело исследование пьезоэлектрических свойств целлюлозы, лишенной волокнистого строения: целлофана, нитей вискозного шелка различной ориентации, а также нитроцеллюлозы (целлулоида).

Несколько замечаний по технике исследования перечисленных материалов. В связи с тем, что выпускаемый в настоящее время промышленностью целлофан обрабатывается глицерином, мы, чтобы избавиться от значительной электрической проводимости пленки, экстрагировали глицерин в большом объеме воды при комнатной температуре в течение суток.

Освобожденный от глицерина целлофан подсушивался на стекле, а затем в сушильном шкафу между прокладками гербарной бумаги под небольшим грузом, что позволило получить пленку без нежелательного коробления. После сушки образцы помещались в эксикатор с хлористым кальцием и находились там до момента испытания. В целлофане обнаружен небольшой, но четкий пьезоэлектрический эффект текстуры $\infty : 2$ (Баженов, 1956). Ось ∞ совпадала с направлением наблюдавшихся на пленке параллельных полос. Небольшая ориентация, совпадающая с этими полосами, обнаруживалась и с помощью поляризационного микроскопа. Эта ориентация — неизбежный результат технологии непрерывного формирования пленки из вискозного раствора, продавливаемого в осадительную ванну через узкую щель (при этих условиях возможен переход текстуры $\infty : 2$ в текстуру $2 : 2$). При этом молекулы целлюлозы ориентировались подобно клеткам в бумажных и картонных листах, как это отмечалось выше. Необходимо отметить, что ориентация клеток в пластинках из волокнистой целлюлозы хорошо моделирует ориентацию молекул целлюлозы в пленках, а оба процесса могут для наглядности сравниваться с явлением ориентации бревен по течению быстрой реки.

Более совершенную ориентацию и соответственно больший пьезоэлектрический эффект той же симметрии был обнаружен и в целлюлоидных пленках, которые получались из фотопленок 9×12 см смыванием фотографического слоя фиксажем (табл. 5). После отмывания и сушки пленки мы четко обнаруживали свойства текстуры $\infty : 2$ или близкой к ней текстуры $2 : 2$ с характерными правилами знаков.

Пьезоэлектрические свойства целлофана, материала с незначительной ориентацией, практически иногда принимаемого за неориентированный, интересно было противопоставить нитям вискозного шелка, подвергнутым вытяжке при осаждении и, следовательно, имевшим высокую степень ориентации. Такие нити были нам любезно предоставлены, как и целлофан, проф. Н. В. Михайловым (Институт искусственного волокна).

Из нитей путем их склеивания клеем БФ-2 были получены пьезоэлектрические элементы, работающие при сжатии, а также пластинки для изготовления элементов, работающих при изгибе и растяжении. Все пьезоэлектрические элементы обнаруживали пьезоэлектрический эффект, больший чем у целлофана в 20 с лишним раз (табл. 5). И в этом случае сохранялась симметрия текстуры $\infty : 2$.

Таким образом, целлюлозные материалы, получаемые из молекулярных растворов, образуют пьезоэлектрические текстуры $\infty : 2$. Элементарной частицей таких текстур является молекула целлюлозы, точечная симметрия которой совпадает с группой симметрии глюкозного остатка (рис. 6). Зная симметрию элементарной частицы (1) и симметрию текстуры ($\infty : 2$), можно установить закон ориентации частиц в текстуре. Эта задача однозначно решается с помощью теоремы IV Шубникова (1946, стр. 26), которая гласит, что получение текстуры $\infty : 2$ из полярных частиц возможно в том случае, когда эти частицы находятся в приблизительно параллельном и антипараллельном положениях в статистических равных количествах, как показано на рис. 8. Такая текстура реали-

Таблица 5

Пьезоэлектрический модуль целлюлозных материалов, выраженный в % от пьезоэлектрического модуля древесины ольхи

Материал	Пьезоэлектрический модуль, %
Древесина ольхи шпон ($-d_{14} = 0.242 \cdot 10^{-8}$)	100.0
Целлофан	3.7
Целлюлоид	27.2
Бумага из древесной целлюлозы	12.8
Ориентированные вискозные нити в затвердевшем клее БФ-2	78.5
Белая сульфитная целлюлоза	11.4
Ориентированная сульфатная целлюлоза специальной варки, отформованная в двухмиллиметровые пластинки	103.0
Бумага из хлопкового волокна	10.0

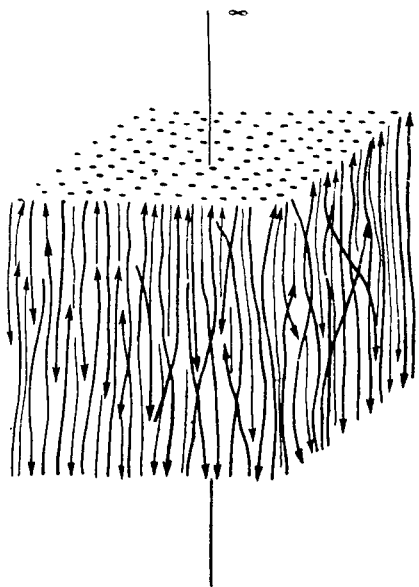


Рис. 8. Схема строения целлюлозы как молекулярной пьезоэлектрической текстуры.

зуется из молекул, первоначально беспорядочно перемешанных, при направленном истечении затвердевающего раствора, как это бывает при изготовлении нитей и пленок гидратцеллюлозы. Необходимо отметить, что текстура $\infty : 2$ легко переходит в текстуру $2 : 2$ при одностороннем пресовании перпендикулярно к оси ∞ . Отсюда следует, что в образцах целлофана, целлюлоида и других пленок возможна и текстура $2 : 2$, которая может получаться из текстуры $\infty : 2$.

Связь пьезоэлектрических свойств древесины и целлюлозы с их строением

Полученную схему ориентации молекул на рис. 8 интересно сопоставить с ориентацией молекул в известной модели целлюлозной ячейки Мейра и Миша (рис. 9). Общее между обеими схемами строения целлюлозы

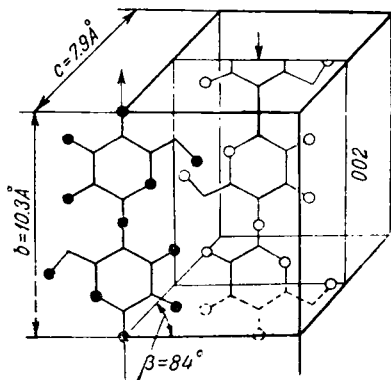


Рис. 9. Пространственная модель элементарной целлюлозной ячейки по Мейру и Мишу.

в том, что в обоих случаях имеется параллельное и антипараллельное расположение молекул. Различие же сводится к тому, что на рис. 8 молекулы ориентируются не по закону пространственных решеток, а на рис. 9 они ориентируются с соблюдением трехмерного порядка, по закону пространственных решеток. В первом случае параллельность и антипараллельность являются приблизительными, во втором случае они геометрически точны.

Среди варьирующей приблизительной «параллельности» не исключаются случаи ее точного осуществления в соответствии со схемой рис. 9. Тем более, что такие случаи регистрируются данными рентгеноструктурного анализа, которые игнорировать нельзя.

Ориентация целлюлозы по схеме рис. 8 может варьировать в широких пределах, вплоть до полного исчезновения, с одной стороны, и приближения к ориентации по схеме рис. 9, с другой стороны.

Какой же тип ориентации преобладает в препаратах природной и регенерированной целлюлозы?

Ориентация целлюлозы по схеме рис. 8 предполагает, что ее структура является пористой, вследствие гибкости нитевидных молекул. К числу ряда известных фактов, свидетельствующих о пористом строении целлюлозы, можно добавить следующий. Установлено, что пропитка древесины ясеня ксилолом, не вызывая изменений в механических свойствах, увеличивает пьезоэлектрический модуль — d_{11} в два раза по сравнению с непропитанной древесиной (Баженов, 1956). Этот факт свидетельствует о проникновении молекул ксилола внутрь пористой структуры целлюлозы и об ориентации их в пьезоэлектрическую текстуру, что возможно при наличии в целлюлозе множества пор, которые соизмеримы с размерами молекул ксилола и во всяком случае меньше так называемых мицелл.

Этот факт может быть поставлен в ряд других фактов, в том числе термодинамических (работы академика В. А. Каргина и его школы), которые свидетельствуют о том, что в целлюлозе преобладает некристаллическая «неплотная» ориентация молекул, а это и оказывает решающее влияние на все ее свойства.

Новое в нашей трактовке заключается в том, что мы обращаем внимание на ориентированное состояние некристаллической целлюлозы, которое

с нашей точки зрения имеет решающее значение в определении ее свойств, и допускаем незначительное существование кристаллической фазы, которое принципиально возможно в схеме рис. 8 и фактически обнаруживается рентгеноструктурным анализом, но ввиду количественной незначительности в текстуре существенно на свойства целлюлозы не влияет.

Схему строения целлюлозы на рис. 8 естественно принять и для фибрилл клеточных оболочек, в которых направление оси ∞ совпадает с длиной фибрилл.

Исходя из известной схемы фибриллярного строения клеточной оболочки (рис. 10), мы получили (Баженков, 1957) формулы для выражения пьезоэлектрических модулей клеток как более крупных частей волокнистых целлюлозных текстур, в том числе древесины.

Для прозенхимных клеток с круглыми и правильными m -угольными сечениями получены следующие формулы для двух неравных нулю компонентов пьезоэлектрического тензора:

$$d_{14}^k = \frac{3 \cos^2 \alpha - 1}{2} d_{14}^{\phi}; \quad d_{25}^k = -\frac{3 \cos^2 \alpha - 1}{2} d_{14}^{\phi},$$

где d_{14}^k и d_{25}^k — пьезоэлектрические модули клетки в ее главной системе координат, d_{14}^{ϕ} — пьезоэлектрический модуль текстуры фибрилл, α — угол наклона фибрилл к продольной оси клетки.

Эти формулы устанавливают для клеток симметрию $\infty : 2$ и показывают зависимость пьезоэлектрических модулей клетки от угла наклона фибрилл. При $\alpha = 0$ пьезоэлектрические модули клетки максимальны и равны пьезоэлектрическому модулю фибрилл; при $\alpha = 54^\circ 40'$ клетки не обладают пьезоэлектрическим эффектом; колебания α объясняют изменчивость пьезоэлектрических свойств у пород с приблизительно одинаковым содержанием целлюлозы.

Пьезоэлектрические модули клеток с неправильными m -угольниками в сечении обнаруживают зависимость от формы клеток. Так, для клеток с прямоугольным сечением получены формулы для трех не равных нулю (остальные равны нулю) пьезоэлектрических модулей:

$$d_{14}^k = \frac{2a \cos^2 \alpha - a + b \cos^2 \alpha}{a + b} d_{14}^{\phi},$$

$$d_{25}^k = \frac{-a \cos^2 \alpha - 2b \cos^2 \alpha + b}{a + b} d_{14}^{\phi},$$

$$d_{36}^k = \frac{a \sin^2 \alpha - b \sin^2 \alpha}{a + b} d_{14}^{\phi},$$

где a и b стороны клетки, перпендикулярные соответственно осям x_1 и x_2 . Эти формулы указывают на то, что пьезоэлектрический тензор клетки прямоугольной формы, равно как и эллипсовидной, имеет симметрию $2 : 2$. Кроме того, знаки модуля d_{36}^k при соотношениях $a > b$ и $a < b$ противоположны. Оба эти вывода получили экспериментальное подтверждение в опытах с прессованной древесиной.

Исследовав пьезоэлектрические свойства клеток и приняв во внимание их дифференциацию по отдельным тканям, мы смогли подойти к изучению

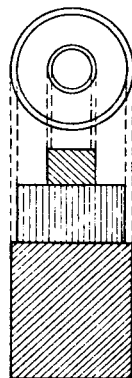


Рис. 10. Схема строения клеточной оболочки, характеризующая ее: слоистость и полосатость. По Бейли.

пьезоэлектрических свойств древесины с учетом поперечной анизотропии и неоднородности ее. Конкретно это выразилось в учете слоистого строения годовых слоев и армирующего влияния сердцевинных лучей, благодаря которым обнаруживается морфологическое различие между радиальным (x_1) и тангенциальным (x_2) направлениями.

Отдельные клетки отличаются друг от друга не только формой и размером, но и толщиной стенок. Тонкостенные клетки концентрируются в ранней части годового слоя, толстостенные — в поздней. Благодаря этому разделению клеток древесина, по крайней мере кольцесосудистых и хвойных пород, оказывается слоистым материалом. В связи с этим

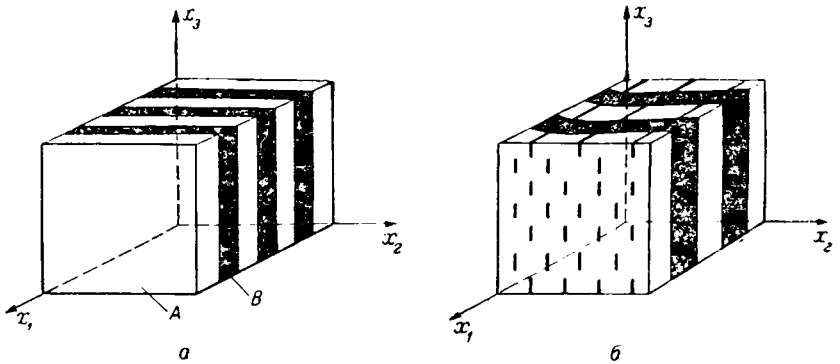


Рис. 11. Схемы строения слоистого материала.

возникает необходимость исследования влияния слоистости на пьезоэлектрические свойства текстур.

Рассмотрим два типа слоистых пьезоэлектрических текстур, которые получаются в результате вполне очевидной схематизации анатомического строения древесины. На рис. 11, *a* представлена схема строения, которой соответствует древесина с выпрямленными годовыми слоями и без сердцевинных лучей. На рис. 11, *б* дана схема, приближенная к действительному макроскопическому строению древесины. Рассмотрев первую схему, можно путем усложнения решенной для нее задачи подойти ко второй схеме, приблизительно воспроизводящей строение древесины.

На схеме рис. 11, *a* система координат X_1, X_2, X_3 является главной для каждой из составляющих текстур *A* и *B*. Если симметрия пьезоэлектрических и упругих свойств текстур *A* и *B* в отдельности характеризуется группой $\infty:2$, то пьезоэлектрические свойства слоистой текстуры $A+B$, как это очевидно из соображений симметрии, будут характеризоваться группой симметрии $2:2$. Пьезоэлектрический тензор текстуры $2:2$ имеет три пьезоэлектрических модуля: d_{14} , d_{25} и d_{36} . Поскольку в текстурах *A* и *B* модуля d_{36} нет, есть основания предполагать, что в слоистой текстуре $A+B$ он будет значительно меньше двух других модулей. С другой стороны, учитывая обратную связь между модулями Юнга пьезоэлектрических элементов и пьезоэлектрическими модулями d_{14} и d_{25} , следующую из приведенных выше формул для определения пьезоэлектрических модулей и экспериментальных работ с древесиной (Баженов, 1953, 1959), мы должны сделать вывод, что для данной слоистой текстуры $A+B$ (прослойка *B* более жесткая) соотношения между абсолютными величинами пьезоэлектрических модулей d_{14} и d_{25} будет характеризоваться неравенством

$$|d_{14}| < |d_{25}|.$$

Искривление слоев A и B , как это показано на рис. 11, б, сопровождается понижением симметрии до группы 2 и появлением ряда новых пьезоэлектрических модулей, которые, однако, не имеют основания быть значительными, поскольку соответствующие им модули не содержатся в исходных текстурах A и B , принадлежащих к группе $\infty : 2$. В этом случае значительными по величине продолжают оставаться модули d_{14} и d_{25} .

Рассмотренные данные говорят о том, что изменения в морфологической симметрии текстуры, вносимые в последнюю ее слоистостью, оказывают влияние на симметрию упругих и пьезоэлектрических свойств в соответствии с известным принципом о связи строения и свойств анизотропных материалов. Это обстоятельство позволяет, опираясь на этот принцип, облегчить анализ более сложных неоднородных текстур.

Древесина является не только слоистой текстурой, но одновременно и текстурой, пронизанной сердцевинными лучами в направлении оси X_1 . В связи с этим принципиальное значение представляет исследование вопроса об изменении упругих и пьезоэлектрических свойств однородных текстур $\infty : 2$ в результате их равномерного армирования в направлении оси X_1 . При таком армировании изменится морфологическая симметрия текстуры с $\infty : 2$ на $2 : 2$. Аналогом такой текстуры являются образцы древесины рассеяннососудистых пород: березы, осины, бука и других, у которых сердцевинные лучи приблизительно параллельны (близ периферии), а годовые слои не разделяются на раннюю и позднюю зоны.

Если жесткость арматуры (серцевинных лучей) выше жесткости вертикальных элементов текстуры, то в тензоре пьезоэлектрических модулей

$$|d_{14}| > |d_{25}|, \text{ при } d_{36} \approx 0.$$

Величина разности $|d_{14}| - |d_{25}|$ будет зависеть от количества сердцевинных лучей и их относительной жесткости по сравнению с жесткостью элементов вертикальных тканей.

У рассеяннососудистых пород (береза, осина и бук) отмечается повышенная разность $|d_{14}| - |d_{25}|$ по сравнению с другими породами. У березы и особенно осины она может быть объяснена высокой жесткостью мелких сердцевинных лучей. Древесина кольцесосудистых и хвойных пород представляет собой текстуру, в которой слоистость сочетается с армирующим эффектом сердцевинных лучей (рис. 11, б). Симметрия упругих свойств древесины, принадлежащая к ромбической сингонии, приблизительно совпадает с морфологической симметрией текстуры на рис. 11, б.

Древесина кольцесосудистых пород характеризуется преобладающим содержанием более жестких прослоек поздней древесины ($B = 70\%$) и большим содержанием сердцевинных лучей (у дуба 36.2% , у ясеня 14.9%), в то время как древесина хвойных характеризуется слоистостью с преобладанием более податливой ранней древесины ($A = 70\%$, $B = 30\%$) и меньшим содержанием сердцевинных лучей (у сосны 5.5% , у ели 4.7%).

Говоря о влиянии сердцевинных лучей на упругие свойства древесины кольцесосудистых и хвойных пород, необходимо иметь в виду их различную относительную жесткость в пределах ранней и поздней части годового слоя, а в связи с этим — и более сложное их влияние на упругие и пьезоэлектрические свойства, чем у рассеяннососудистых пород.

В древесине сосны фактор слоистости стремится создать соотношение $|d_{14}| < |d_{25}|$, а армирующее влияние сердцевинных лучей $|d_{14}| \gg |d_{25}|$.

В результате совместного влияния того и другого в древесине сосны экспериментально обнаруживаются соотношения: $|d_{14}| > |d_{25}|$.

В силу варьирования содержания поздней древесины у древесины сосны (см. табл. 1) и ели (Баженов, 1953) иногда наблюдаются соотношения $|d_{14}| \approx |d_{25}|$.

Упругие и пьезоэлектрические свойства древесины дуба также испытывают противоположные влияния слоистости и присутствия сердцевинных лучей. В древесине дуба с высоким содержанием поздней древесины ($\approx 85\%$) наблюдается $|d_{14}| \approx |d_{25}|$. Такое соотношение можно объяснить тем, что в этом случае достаточно сильно выявляется тенденция перерождения слоистой текстуры $A \perp B$ в однородную текстуру B , в которой сердцевинные лучи не очень значительно отличаются по жесткости от тканей поздней древесины.

В древесине дуба с более низким содержанием поздней древесины наблюдается $|d_{14}| > |d_{25}|$, здесь роль сердцевинных лучей в более развитых прослойках ранней древесины более существенна.

В древесине дуба рост $|d_{14}|$ и $|d_{25}|$ от периферии к центру совпадает с ростом процента поздней древесины и связанного с ним объемного веса в том же направлении.

В древесине сосны изменчивость $|d_{14}|$ и $|d_{25}|$ вдоль радиуса ствола согласуется с характером изменчивости упругих свойств и строения древесины.

Армирующий эффект сердцевинных лучей, сходящихся в центре ствола, не может быть одинаковым вдоль радиуса ствола. Это обстоятельство, а также варьирование процента поздней древесины, толщины и размеров элементов, слагающих годовые слои, усложняют аналитическое изучение упругих, пьезоэлектрических и других свойств древесины.

Изложенные соображения не оставляют сомнения в том, что неравенство $|d_{14}| > |d_{25}|$ является следствием неоднородности анатомического строения древесины, вытекающего из неоднородности клеток древесины и закономерностей их тканевых группировок, качественно типичных для отдельных пород, но количественно варьирующих в довольно широких пределах.

Учитывая возможную структурную разницу между легко и трудно гидролизруемыми полисахаридами, которая, как известно, дискутируется, мы предприняли попытку прямым опытом установить, в какой мере каждый из них ответственны за пьезоэлектрический эффект древесины сосны.

Полученные материалы не дали однозначного ответа на поставленный вопрос, поскольку указанные полисахариды находятся между собой в мало изменяющихся соотношениях.

Однако ввиду наличия пьезоэлектричества в моносахарах — продуктах гидролиза пентозанов и гексозанов и отсутствия существенного различия в критериях K_r^o и K_l^o (см. табл. 4) у хвойных и лиственных пород, различающихся по содержанию целлюлозы и почти одинаковых по общему содержанию полисахаридов, есть все основания для вывода о наличии пьезоэлектричества в пентозанах и гексозанах, при условии ориентации их молекул в пьезоэлектрическую текстуру, как и для целлюлозы.

Пьезоэлектрический эффект древесины дает новый подход к изучению ее субмикроскопического строения и уяснению роли последнего в общем комплексе вопросов, определяющих связь строения древесины с ее свойствами.

Показатели пьезоэлектрических свойств древесины могут использоваться в качестве количественных характеристик ориентации целлюлозы в древесине, древесных и целлюлозных материалов, что весьма существенно для изучения анизотропии этих материалов и улучшения их свойств различными обработками.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- Баженов В. А. Пьезоэлектрический эффект в древесине. Тр. Инст. леса АН СССР, Изд. АН СССР, т. 9, 1953.
- Баженов В. А. Пьезоэлектрические свойства древесины и целлюлозных материалов. Изв. АН СССР, сер. физ., т. XX, № 2, 1956.
- Баженов В. А. Древесина как пьезоэлектрическая текстура. Кристаллография, т. 2, в. 1, 1957.
- Баженов В. А. Пьезоэлектрические свойства древесины. Изд. АН СССР, 1959.
- Баженов В. А., В. П. Константинова. Пьезоэлектрические свойства древесины, ДАН СССР, Нов. сер., т. LXXI, № 2, 1950.
- Желудев И. С., Л. А. Шувалов. К вопросу о симметрии физических свойств полидоменного кристалла сегнетовой соли. Тр. Инст. кристаллогр. АН СССР, в. 12, 1956.
- Кеди У. Пьезоэлектричество и его практические применения. Изд. иностр. лит., 1949.
- Копчик В. А. Исследование новых пьезоэлектрических кристаллов. Изв. АН СССР, сер. физ., т. XX, № 2, 1956.
- Мезои У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке. Изд. иностр. лит., 1952.
- Шубников А. В. Пьезоэлектрические текстуры. Изд. АН СССР, 1946.
- Шубников А. В., И. С. Желудев, В. П. Константинова, И. М. Сильвестрова. Исследования пьезоэлектрических текстур. Изд. АН СССР, 1955.
- Шубников А. В., Е. Е. Флинт, Г. В. Бокий. Основы кристаллографии. Изд. АН СССР, 1940.
- Усманов Х. У. и В. А. Каргин. Сб.: «Химия и физико-химия высокомолекулярных соединений». Изд. АН СССР, 1952.
- Fukada Eiichi. Piezoelectricity of Wood. J. Physic. Soc. of Japan, v. 10, № 2, 1955.
- Wooster W. A. A text-book on crystal physics. Univers. press, Cambridge, 1938.

К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЫСОКОЭЛАСТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Ю. М. ИВАНОВ

Недавно обнаружен факт появления у набухшей древесины больших деформаций, которые по своей величине хотя и значительно меньше каучукоподобных или высокоэластических деформаций, но имеют все характерные черты, свойственные деформациям высокомолекулярных веществ, к которым относятся также целлюлоза и другие образующие древесину сложные органические соединения. Высокомолекулярные вещества, имеющие такие свойства в высокоэластическом состоянии, получившем свое название от упомянутых деформаций, могут в известных условиях (охлаждение, удаление пластификатора) терять способность к большим обратимым высокоэластическим деформациям и приобретать малую деформативность и другие свойства, напоминающие свойства полимерных стекол, переходя в так называемое стеклообразное состояние, или состояние застеклования.

Теперь выяснено, что, подобно обширному классу указанных веществ, и натуральная древесина, обычно напоминающая по характеру своих деформаций органические стекла, находится в своеобразном состоянии застеклования. Однако в определенных условиях она может показывать совершенно иную, каучукоподобную упругость, переходя в другое физическое состояние — состояние высокой эластичности (Иванов, 1956, 1957а, 1960; Иванов и Баженов, 1959).

Этот установленный теперь факт показал, что накопленные до настоящего времени знания о свойствах древесины относятся в сущности лишь к одному из возможных ее физических состояний, хотя и широко распространенному в природе. Исследование высокоэластического состояния древесины должно явиться одной из ближайших задач физики древесины. Необходимость этого изучения вытекает не только из значения нового состояния для выяснения природы деформаций древесины, но также из того, что иногда оно предшествует разрушению и его исследование может пролить свет на механизм разрушения древесины. Кроме того, сам по себе этот факт не может не влиять на наши представления о свойствах натуральной древесины, позволяя с новых позиций глубже понять ее поведение в обычном для нее состоянии застеклования.

Настоящая работа имеет целью вкратце изложить состояние вопроса о новых явлениях, происходящих в древесине при процессе перехода ее из состояния застеклования в состояние высокой эластичности, природу деформаций натуральной древесины в двух ее физических состояниях и свойства ее в состоянии высокой эластичности.

1. Одной из существенных предпосылок к постановке интересующего нас вопроса явилось представление о двух областях деформирования, которые последовательно проходит древесина при возрастающем напряжении: первую (I) — область обычной упругости и вторую (II) — область интенсивного развития деформаций; граница этих областей определяется напряжением σ_{I-II} , названным нами ранее пределом пластического те-

чения, величина которого снижается с увеличением продолжительности действия нагрузки.

В первой области деформация древесины в основном упругая при «мгновенном»¹ модуле, равном $1-1.5 \cdot 10^5$ кг/см² (у воздушно-сухой древесины при комнатной температуре) и сохраняющем постоянную величину² при развитии деформации упругого последействия, которая быстро достигает постоянного значения, с модулем, по нашим опытам в 5—6 раз большим модуля упругой деформации. Во второй области, по превышении σ_{I-II} , характер деформирования резко меняется и происходит интенсивное развитие деформаций во времени, с быстрым увеличением остаточной деформации.

Указанные две области деформирования отчетливо проявляются, например, при сжатии вдоль волокон. Деформации во второй области достигают под действием даже постоянного напряжения $\sigma > \sigma_{I-II}$ сравнительно большой величины — до 300% от «мгновенной» деформации, или около 1% первоначальной длины, как это нами было получено для воздушно-сухой древесины бука (Иванов, 1954). Микромеханическими исследованиями показано, что столь значительные деформации не связаны с какими-либо микроскопическими изменениями строения древесины.

Учитывая отсутствие таких изменений и то, что основная доля усилия воспринимается сильно развитыми вторичными оболочками механических волокон, образованными преимущественно высокоориентированной целлюлозой, следует заключить, что измеряемая деформация древесины при сжатии вдоль волокон непосредственно связана со свойствами целлюлозы.

Поразительный факт, привлекающий к себе внимание, — это непрерывное снижение модуля упругости по мере развития деформаций древесины во второй области. Достигнутый к моменту разгрузки уменьшенный модуль упругости при последующем приложении напряжений в первой области, т. е. меньших σ_{I-II} , остается неизменным. Если развитие этих деформаций может быть связано с непрерывным разрушением и восстановлением физических связей макромолекул целлюлозы, то снижение модуля упругости должно свидетельствовать о некотором преобладании разрушения связей над их восстановлением; с ростом концентрации невосстановленных, нарушенных связей должно происходить повышение гибкости структуры древесины, характеризующееся снижением модуля деформаций.

Если это предположение верно, то уменьшение модуля упругости должно быть еще большим в условиях ослабления связей, например вследствие набухания. С целью выяснения природы указанного явления мы поставили опыты с деформированием во второй области при сжатии вдоль волокон набухшей древесины трех пород бука, дуба и лиственницы. Методика опытов описана в наших работах 1956—1957 гг.

Проведенные опыты дали вполне воспроизводимые результаты и подтвердили изложенные выше предположения. Действительно, в случае набухшей древесины величина модуля «мгновенной» деформации падает под действием напряжения $\sigma > \sigma_{I-II}$ более значительно (рис. 1), чем это мы наблюдали в воздушно-сухой древесине. «Мгновенная» деформация при разгрузке больше, чем при нагружении; остаточная деформация сравнима

¹ Практически нагрузка изменяется в конечное, хотя и довольно короткое время (секунды).

² Или даже несколько повышающемся после достижения постоянной деформации упругого последействия. Такое влияние развития упругого последействия на модуль упругости было нами предложено называть «временным повышением жесткости».

по величине с упругой «мгновенной»; полная деформация y_2 во много раз превышает начальную «мгновенную» y_1 , в некоторых опытах с буком — до 30—45 раз, при величине относительной полной деформации более 10 % и «мгновенной» более 5%.

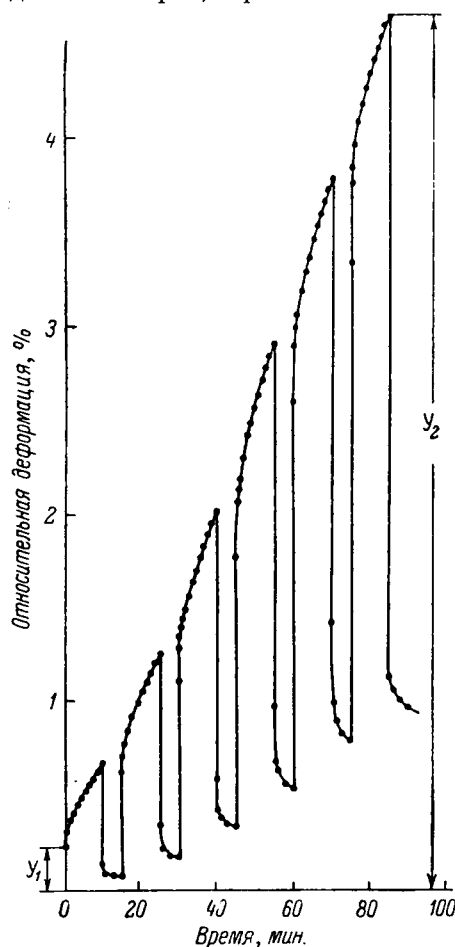


Рис. 1. Деформации при сжатии вдоль волокон во второй области набухшей древесины бука, при переходе ее в высокоэластическое состояние (напряжение — 262 кг/см², σ_{I-II} = 238 кг/см², 17.6° С).

Проверка обратимости остаточной деформации показала, что при прогреве образца в воде при +90° в течение 4 часов она почти полностью восстанавливается. Следовательно, остаточные деформации во второй области, ошибочно принимавшиеся нами ранее за необратимые, в действительности являются задержанными термообратимыми деформациями.

Таким образом, налицо все характерные черты деформации, свойственной полимерам в высокоэластическом состоянии. Следовательно, набухшая древесина под действием напряжения $\sigma > \sigma_{I-II}$, т. е. во второй области, переходит в другое физическое состояние — состояние высокой эластичности.

2. В отличие от описанных данных, при действии напряжений $\sigma < \sigma_{I-II}$, т. е. в первой области, набухшая натуральная древесина показывает почти постоянную упругую «мгновенную» деформацию (рис. 2), которая составляет основную долю полной деформации. Такое поведение древесины при силовом воздействии характерно для полимеров в стеклообразном состоянии и кристаллических тел, деформации которых в основном определяются изменениями междоучастных расстояний. Этим объясняется мгновенное установление упругой деформации при приложении силы, с сравнительно большой величиной модуля.

Выше было отмечено, что механические свойства древесины при сжатии вдоль волокон непосредственно определяются свойствами высокоориентированной целлюлозы вторичных оболочек. Таким образом, отмеченное поведение набухшей древесины в первой области, очевидно, обусловливается состоянием застеклования целлюлозы³ вторичных оболочек.

Своеобразное стеклование сильно полярного линейного полимера, как целлюлоза и ее производные, в процессе вытяжки волокон впервые было установлено Н. В. Михайловым и В. А. Каргиным (1948). В описанных ими опытах ориентированное в результате сильной вытяжки гидрат-

³ В дальнейшем для краткости этот термин мы будем относить к древесине.

целлюлозное волокно переходило в стеклообразное состояние вследствие увеличения жесткости молекулярных цепей, уменьшения числа возможных их конфигураций и потери, в итоге, эластических свойств.

Состояние застеклования высокоориентированной природной целлюлозы вторичных оболочек древесины может быть названо естественным в отличие от искусственного застеклования, полученного Михайловым и Каргиным при вытяжке гидратцеллюлозных волокон. Естественное состояние застеклования древесины, очевидно, возникает в процессе биосинтеза, когда образуется в результате жизнедеятельности камбия высокоориентированная целлюлоза вторичных оболочек.

По нашим опытам с воздушно-сухим буком (см. выше) полная деформация во второй области превышает упругую «мгновенную» в три раза,

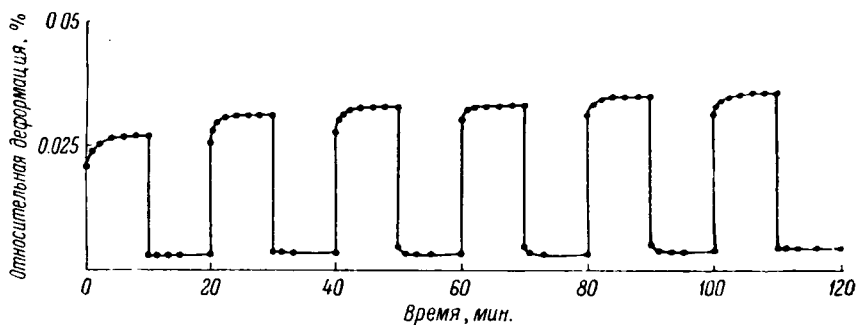


Рис. 2. Деформации при сжатии вдоль волокон в первой области набухшей древесины бука в состоянии застеклования (напряжение — 180 кг/см², $\sigma_{I-II} = 225$ кг/см², 16.1°C).

причем почти полностью за счет роста остаточной деформации; «мгновенная» же деформация увеличивается лишь на несколько процентов.

Таким образом, при сжатии вдоль волокон воздушно-сухой древесины во второй области гибкость системы возрастает сравнительно мало, так как развитие деформаций происходит главным образом за счет увеличения остаточной деформации и снижение «мгновенного» модуля незначительно. Поэтому выход в высокоэластическое состояние не реализуется и древесина фактически остается в том же первоначальном состоянии застеклования.

Увеличенная эластическая деформация в стеклообразном состоянии за счет роста остаточной деформации при достижении определенного напряжения является характерным свойством высокополимеров и называется вынужденной эластической деформацией, а соответствующее напряжение, при котором она проявляется, — пределом вынужденной эластичности (Александров, 1945; Лазуркин, Фогельсон, 1951). Поэтому описанная деформация воздушно-сухой древесины во второй области по существу является вынужденной эластической деформацией, а граница двух областей, т. е. напряжение σ_{I-II} , по аналогии с неориентированными полимерами, может быть названа пределом вынужденной эластичности древесины. Практическое значение этого вывода заключается в том, что для конструктивных применений воздушно-сухой древесины существенными являются механические свойства, обусловленные состоянием застеклования древесины и возможностью появления вынужденной эластической деформации и ее развития, предшествующего разрушению, как это происходит, например, при сжатии вдоль волокон.

Если вынужденная эластическая деформация происходит с нарушением некоторого количества физических связей макромолекул целлюлозы в си-

ловом поле,⁴ то следует предполагать, что связи эти мгновенно восстанавливаются почти в том же количестве после уменьшения напряжения ниже предела вынужденной эластичности, т. е. σ_{I-II} , чем и обуславливается рост деформаций за счет остаточной ее части. Реализацию такого процесса следует объяснить, по-видимому, большей вероятностью (в условиях сближенного расположения молекулярных цепей в стеклообразном состоянии) взаимного приближения полярных групп соседних цепей с последующим их блокированием. С таким представлением механизма вынужденной эластической деформации согласуется и термообратимый характер возникающей при этом остаточной деформации: при нагреве в результате тепловой активации происходит диссоциация и перераспределение связей, возвращение звеньев и участков цепей в прежнее положение, с восстановлением первоначальной формы образца.

3. В отличие от вынужденной эластической деформации, развивающейся во второй области в состоянии застеклования, высокоэластическая деформация древесины, характеризующая состояние того же названия, превышает истинную упругую деформацию (упругая «мгновенная» деформация натуральной древесины) в десятки раз (в описанных выше опытах — в 30—45 раз, при максимальной относительной величине более 10%), причем рост ее происходит в основном за счет увеличения «мгновенной» деформации, достигающей 5%.

Упругая деформация, обусловленная изменениями средних междучастичных расстояний, остается и при появлении высокоэластической деформации, но при малой относительно доле упругой деформации поведение полимера в высокоэластическом состоянии целиком определяется высокоэластической деформацией.

Каковы же характерные черты и природа высокоэластической деформации полимеров? Две основные особенности этой деформации — ее большая величина и обратимость — находят свое объяснение в том, что сильно изогнутые гибкие молекулярные цепи полимера, состоящие из тысяч молекул мономера, образующих звенья цепей, могут в высокоэластическом состоянии располагаться многими способами, т. е. давать многочисленные конфигурации (Mark, 1938). Поперечные (сетчатые) связи между цепями линейных полимеров не стесняют их больших деформаций, обеспечивая в то же время их обратимость.

Для иллюстрации укажем на вулканизированный каучук, т. е. резину. Серные мостики, являющиеся сетчатыми связями вулканизации между макромолекулами линейного полимера, каким является натуральный каучук, не препятствуют чрезвычайно большому обратимым высокоэластическим деформациям резины, достигающим более 1000% первоначальной длины. Имеются указания на возможность существования и в целлюлозе редких поперечных сетчатых связей (Михайлов, Каргин, Бухман, 1940). В данном случае мы имеем в виду лишь поперечные связи, обеспечивающие обратимость высокоэластической деформации природной целлюлозы у набухшей в воде древесины.

Так как высокоэластическая деформация обуславливается перемещениями звеньев и участков цепей, то имеющаяся средняя ориентация цепей, т. е. наличие некоторого преимущественного направления их продольных осей (вдоль которых они несколько вытянуты), сохраняется в высокоэластическом состоянии. Поэтому, несмотря на довольно большие деформации древесины в высокоэластическом состоянии, система структурной

⁴ Вопрос о характере нарушения связей в данном случае является дискуссионным. Так, Ю. С. Лазуркин (1954) считает, что вынужденная эластическая деформация реализуется вследствие лабильности связей.

анизотропии целлюлозы вторичных оболочек, а следовательно и древесины, сохраняется. Возможность же больших деформаций целлюлозы среднего слоя вторичных оболочек в направлении вдоль волокон объясняется значительно меньшей жесткостью первичной оболочки, наружного и внутреннего слоев вторичной оболочки и межклеточного вещества. Направление ориентации в первичной оболочке,⁵ в наружном и внутреннем слоях вторичной оболочки⁶ близко к поперечному (Bailey, 1954). Межклеточное же вещество, состоящее главным образом из лигнина, является неориентированным, изотропным, и поэтому значительно более деформативным в направлении вдоль волокон, чем целлюлоза вторичных оболочек.

Что же происходит при деформировании во второй области набухшей древесины?

При действии напряжений, превышающих σ_{I-II} , состояние естественного застеклования целлюлозы вторичных оболочек в условиях ослабленного набуханием молекулярного взаимодействия постепенно преодолевается. Это проявляется в значительном снижении модуля «мгновенной» деформации и росте полной деформации. Наблюдаемое увеличение гибкости системы, по-видимому, обуславливается повышением подвижности звеньев и участков цепей целлюлозы, вследствие нарушения внутри- и межмолекулярных связей.

Наблюдающееся при этом, с момента превышения определенной величины напряжения σ_{I-II} , увеличение подвижности цепей происходит, по-видимому, в результате снижения в силовом поле потенциального барьера нарушения связей. Напряжение σ_{I-II} , которое правильно называть началом роста эластичности $\sigma_{нр}$, очевидно, не может быть постоянным, а должно снижаться с увеличением продолжительности силового воздействия, что и показывает опыт. Наблюдаемый рост эластических деформаций является, таким образом, результатом механической активации процесса повышения подвижности цепей целлюлозы вторичных оболочек. Существенную роль при этом играет превышение напряжением величины σ_{I-II} . Это следует из того, что при тех же условиях набухания, температуры и режима механических воздействий деформации натуральной древесины в первой области имеют совершенно другой характер — «мгновенная» деформация остается почти постоянной (рис. 2), равновесный модуль⁷ превышает «мгновенный» упругий почти в четыре раза, а остаточные деформации в набухшей древесине восстанавливаются по истечении одних-двух суток, без повышения температуры.

Итак, механические свойства набухшей древесины определяются состоянием ее застеклования только до тех пор, пока напряжение находится в границах первой области, т. е. не превосходит σ_{I-II} . С превышением величины последнего реализуется постепенный переход древесины в высокоэластическое состояние, которое и обуславливает в этом случае природу механических свойств набухшей древесины.

Кроме сходства в характере и природе высокоэластической деформации, имеется и отличие высокоэластического состояния древесины от

⁵ При набухании холоцеллюлозы ели в серной кислоте первичная оболочка об-наруживает сетчатое строение (Одинцов, 1957).

⁶ Внутренний слой вторичной оболочки иногда принимается за третичную оболочку (Москалева, 1957).

⁷ Соответствует полному возвращению деформаций через некоторое время после разгрузки.

высокой эластичности неориентированных полимеров. Обычно рост эластичности, наблюдаемый у полимеров при выходе из стеклообразного состояния и обусловливаемый увеличением подвижности звеньев и участков полимерных цепей (Александров, Лазуркин, 1944; Журков, 1945), происходит при нагревании выше температуры стеклования T_g . У набухшей древесины рост эластичности при выходе ее из состояния естественного застеклования проходит при постоянной температуре, но под действием силового поля. Эта разница отвечает различному происхождению состояния застеклования у неориентированных полимеров и древесины. В первом случае стеклообразное состояние вызвано охлаждением ниже T_g ,⁸ поэтому выход из него реализуется при нагревании выше T_g — и обратно. В случае же природной целлюлозы, состояние застеклования которой явилось результатом высокой ориентации молекулярных цепей, повышение температуры, как показывают опыты, не достигает цели, а необходимо наложение силового поля определенной интенсивности. Известно, что смена физических состояний, происходящая при изменении температуры у неориентированных полимеров, может быть достигнута также изменением концентрации пластификатора, так что увеличение последней в известном отношении эквивалентно повышению температуры (Каргин, Малинский, 1952). В данном случае, поскольку повышение температуры не выводит природную целлюлозу из состояния застеклования, очевидно, и повышение содержания влаги (до максимального возможного при сорбции, т. е. до гигроскопической точки) для этого будет недостаточно, что и подтверждается опытом, который в обоих случаях показывает необходимость наложения силового поля на древесину, причем именно при максимальном содержании пластификатора (воды).⁹ Однако снятие силового поля не приводит к потере древесинной высокоэластических свойств, так как возвращения ее в прежнее состояние застеклования не наблюдается.

Таким образом, однажды происшедший выход древесины из состояния застеклования носит в данных условиях постоянный характер и древесина сохраняет новое состояние высокой эластичности так же устойчиво, как и обычное состояние застеклования. Это указывает на устойчивость в данных условиях нарушения связей, вызванного действием силового поля. Весьма низкие значения модулей в высокоэластическом состоянии длительно сохраняются. Так, повторные испытания образцов бука в первой области (при напряжении 97.5 кг/см^2), проведенные в течение почти 2 лет, сопровождавшиеся периодическим высушиванием в комнатных условиях и увлажнением образцов, показали примерно те же величины модулей; значения последних, как можно было ожидать, не изменились и после прогрева образцов в воде при 90° в течение 4—5 часов, с последующим охлаждением до комнатной температуры.

Переход набухшей древесины из состояния застеклования в состояние высокой эластичности в силовом поле $\sigma > \sigma_{I-II}$ происходит очень быстро, причем наблюдается значительный рост деформации — через 60 мин. «мгновенная» высокоэластическая деформация превышала упругую деформацию натуральной древесины почти в 20 раз (рис. 1). Бурный рост деформации в основном определяется быстрым нарастанием доли высокоэластической деформации, обладающей определенной скоростью установления при данной температуре. Соответствующее падение модуля «мгно-

⁸ Согласно Г. М. Бартеневу (1956), — это структурное стеклование.

⁹ См. ниже в этом томе нашу статью «К вопросу застеклования природной целлюлозы в древесине».

венной» деформации обуславливается ростом части высокоэластической деформации, связанной с малыми периодами релаксации.

Сравнивая наклон отдельных участков кривых, изображенных на рис. 1, 3 и 4, можно видеть, что, хотя каждый участок имеет несколько выпуклое очертание, иногда переходящее в прямолинейное, все участки вместе образуют ясно выраженную вогнутую к оси времени кривую (вер-

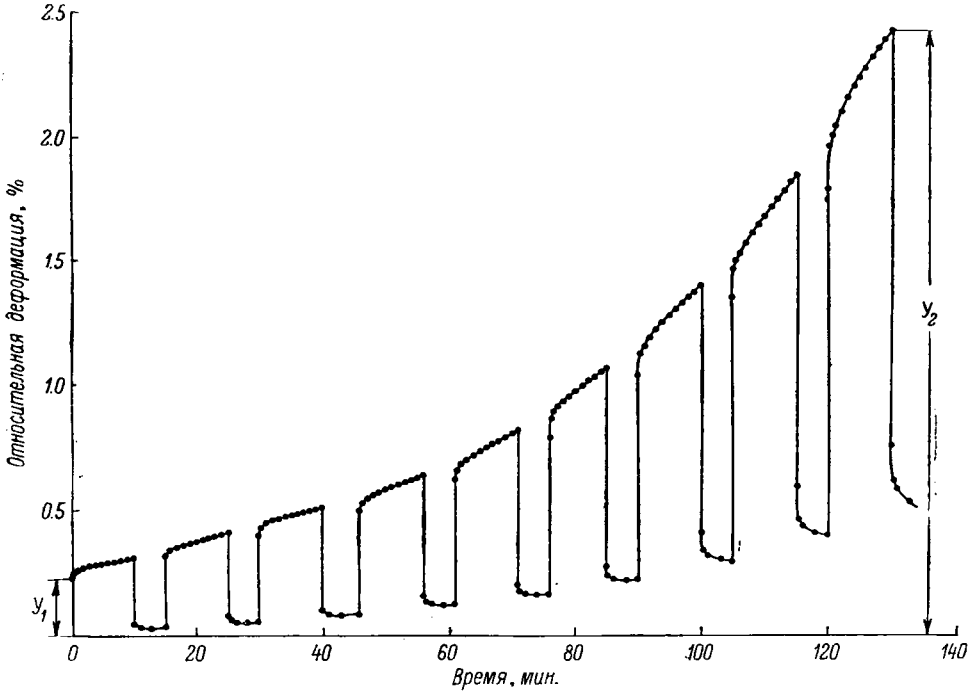


Рис. 3. Деформации при сжатии вдоль волокон во второй области набухшей древесины лиственницы, при переходе ее в высокоэластическое состояние (напряжение — 242 кг/см^2 , $\sigma_{I-II} = 228 \text{ кг/см}^2$, 16.0° C).

нее — ломаную, расположенную по вогнутой кривой), что отчетливо заметно на рис. 3 и 4 и слабее — на рис. 1. Таким образом, при непрерывном действии постоянного сжимающего напряжения скорость деформации несколько уменьшается или сохраняется постоянной, однако при переходе от одного участка деформирования к другому, т. е. после разгрузки, она всегда увеличивается. Очевидно, снятие силового поля ускоряет рост высокоэластической деформации¹⁰ при последующем наложении поля той же интенсивности.

Этому явлению можно дать следующее объяснение. Разрушение связей, которое, как указывалось выше, происходит под действием силового поля, должно сопровождаться частичным их восстановлением в том же поле, поскольку со всяким силовым полем связаны ориентационные процессы (Александров, Лазуркин, 1939). Очевидно, удаление силового поля при разгрузке снимает ориентирующий эффект последнего, чем затрудняет восстановление связей. Действительно, вероятность блокиро-

¹⁰ Нечто подобное было отмечено Н. В. Михайловым и В. А. Каргиным (1948), которые достигали больших вытяжек гидратцеллюлозного волокна в результате многократной периодической нагрузки и разгрузки, т. е. периодической релаксации цепей.

вания полярных групп молекулярных цепей (разъединенных при разрыве связей) должна уменьшаться в условиях новых перегруппировок звеньев и участков цепей при разгрузке, что должно вызвать повышение концентрации невосстановленных нарушенных связей.

Подтверждением такого объяснения может служить замеченное нами (во время проведения описанных выше опытов с набухшей древесиной)

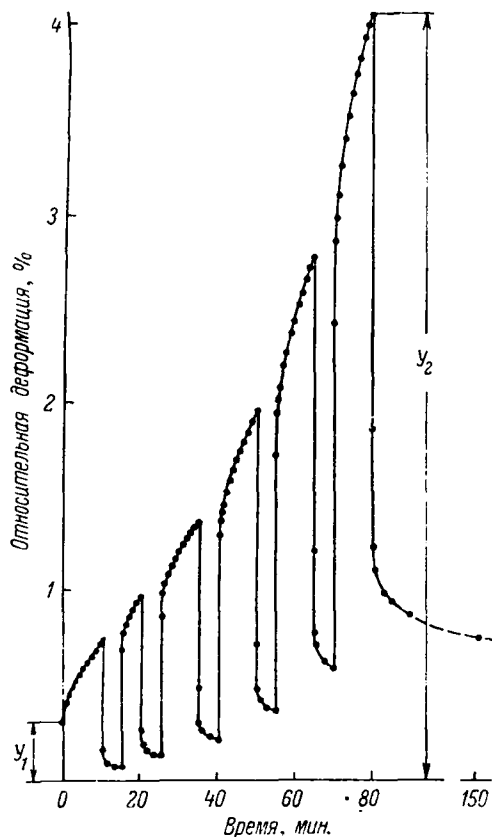


Рис. 4. Деформации при сжатии вдоль волокон во второй области набухшей древесины дуба, при переходе ее в высокоэластическое состояние (напряжение — 214 кг/см^2 , $\sigma_{I-II} = 203 \text{ кг/см}^2$, 17.6° C).

сопровождается течением (Догадкин, 1947), совершенно отсутствующим у набухшей древесины.

Если считать, что пачки цепей целлюлозы в древесине как бы склеены между собой пленками, то для развития значительных деформаций должно произойти разрушение склеивающей пленки. Такое предположение основывается на разнице, которая должна быть в поведении под нагрузкой, например, у отдельного волокна, поперечные деформации которого при растяжении или сжатии ничем не стеснены, по сравнению с поведением склеенных между собой волокон в монолитный пакет, в котором каждое волокно связано с соседними волокнами, имея стесненные поперечные деформации. Разрушение подобной склеивающей пленки, очевидно, вызовет рост деформаций, который в то же время приобретает

более интенсивное повышение скорости роста высокоэластической деформации в случае полного освобождения образца при разгрузке от действия какого-либо, даже самого малого груза. Очевидно, что в таких условиях релаксация цепей могла происходить более полно. Все последующие опыты нами всегда проводились при строгом соблюдении указанного условия.

4. Одна из отличительных особенностей состояния высокой эластичности древесины, а именно — фиксированная ее степень, обусловленная той долей высокоэластической деформации, которая достигнута в результате действия силового поля, может навести на мысль о правомерности и другого объяснения больших деформаций набухшей древесины во второй области. Для внесения большей ясности в этот вопрос рассмотрим другие возможные объяснения описываемого явления.

Постоянный характер роста больших деформаций у набухшей древесины в указанных условиях можно попытаться объяснить разрушением некоторых препятствий, кроющихся в сложной структуре природной целлюлозы в древесине. Нечто подобное наблюдается, например, у сырого каучука при первичном деформировании, хотя оно

постоянный характер, поскольку пленка не будет восстанавливаться при снятии нагрузки.

Однако в условиях продольного сжатия древесины постепенное разрушение склеивающей пленки по мере роста деформаций вызовет снижение сопротивления пачек цепей действию снимающей силы вследствие неизбежного бокового выгиба и выпучивания их при меньшей силе. Таким образом, предположение о постепенном нарушении слитной работы пачек цепей в результате разрушения склеивающей их пленки равносильно допущению прогрессирующего ослабления структуры с увеличением деформации, в результате чего общая жесткость материала должна падать, вызывая в условиях действия постоянного напряжения рост не только величины деформации, но и ее скорости.

Опыт показывает как раз противоположное: при выдерживании образца набухшей древесины под постоянным напряжением сжатия

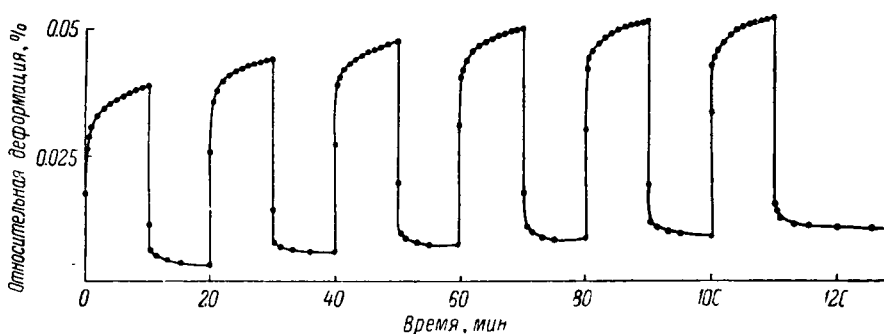


Рис. 5. Деформации при сжатии вдоль волокон в первой области набухшей древесины бука в высокоэластическом состоянии (напряжение — 85 кг/см^2 , $\sigma_{I-II} = 225 \text{ кг/см}^2$, $19,0^\circ \text{ C}$).

$\sigma > \sigma_{I-II}$ скорость деформации или остается постоянной, или даже уменьшается, как это было отмечено выше (рис. 1, 3 и 4). Таким образом, предположение о решающей роли инкрустов, склеивающих пачки цепей целлюлозы, опытом не подтверждается.

Если все же настаивать на роли инкрустов, то остается предположить, что они находятся в межмолекулярных пространствах целлюлозы. Тогда между молекулами инкрустов и целлюлозы будут образовываться связи, разрушению которых должно быть приписано появление больших деформаций. Но в таком случае для объяснения роста деформации привлекается молекулярный механизм нарушения связей, независимо от того, будут ли они между целлюлозой и инкрустами или у самой целлюлозы. Таким образом, снова приходим к предположению, которое было высказано нами ранее. Это предположение о молекулярном механизме роста высокоэластической деформации подтверждается отмеченным выше ускорением его в результате релаксации цепей во время отдыха при разгрузке.

5. Механические свойства древесины в высокоэластическом состоянии в первой области, т. е. при действии напряжения $\sigma < \sigma_{I-II}$, характеризуются постоянством «мгновенной» деформации (рис. 5). В отличие от такой же древесины натуральной в состоянии застеклования, древесина в высокоэластическом состоянии имеет пониженную величину модуля как «мгновенной» деформации, так и эластической, причем оба эти модуля близки между собой по величине.

Постоянство «мгновенной» деформации приблизительно сохраняется и при более значительной относительной величине полной деформации — до 8% (рис. 6). Заметные колебания величины последней в данном случае объясняются неизбежно менее равномерным во времени приложением нагрузки при столь большой абсолютной величине «мгновенной» деформации — до 1.0 мм, что видно и по колебаниям положения точек, соот-

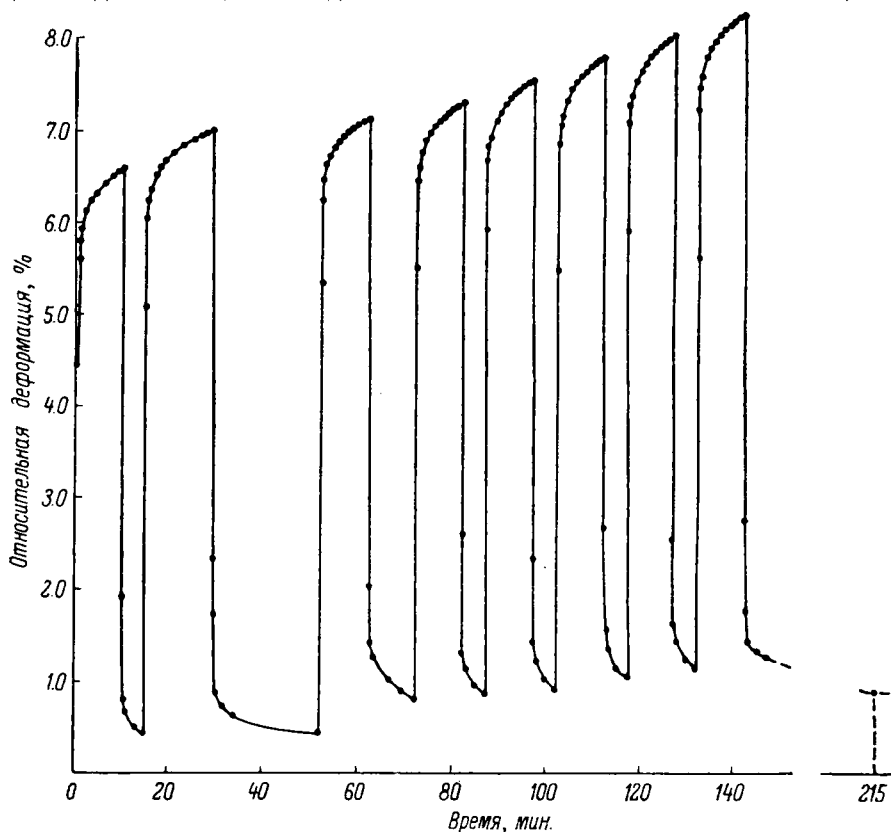


Рис. 6. Деформации при сжатии вдоль волокон в первой области набухшей древесины бука в высокоэластическом состоянии (напряжение — 200 кг/см², $\sigma_{I-II} = 225$ кг/см², от 17.8 до 18.8° С).

ветствующих моменту окончания разгрузки и начала нагружения образца. По-видимому, на некоторый рост полной деформации оказало также влияние повышение температуры с 17.8 до 18.8°, происшедшее в данном опыте.

Как уже отмечалось, древесина в высокоэластическом состоянии имеет низкий модуль «мгновенной» деформации, вследствие чего показывает совершенно иную анизотропию упругости, сама природа которой меняется. Так, в приведенном примере (рис. 6) модуль «мгновенной» деформации вдоль волокон приближается по величине к модулю в поперечном направлении.

Столь резкое изменение системы упругой анизотропии при переходе древесины в высокоэластическое состояние, пожалуй, наиболее наглядно показывает, что механические свойства древесины обуславливаются прежде всего тонким строением, свойствами и физическим состоянием высокоориентированной целлюлозы вторичных оболочек механических волокон, а микроскопические особенности строения древесины играют меньшую роль.

Характерной особенностью высокоэластической деформации является большое влияние температуры на скорость ее установления при сравнительно малом влиянии на величину деформации (Кобеко, Кувшинский, Гуревич, 1937), поскольку деформация полимеров в высокоэластическом состоянии представляет собой обратимый релаксационный процесс, т. е. процесс, определяемый вероятностью перегруппировок частиц под действием теплового движения (Александров, Лазуркин, 1939). Иллюстрируется это зависимостью высокоэластической деформации от температуры и времени действия силы.

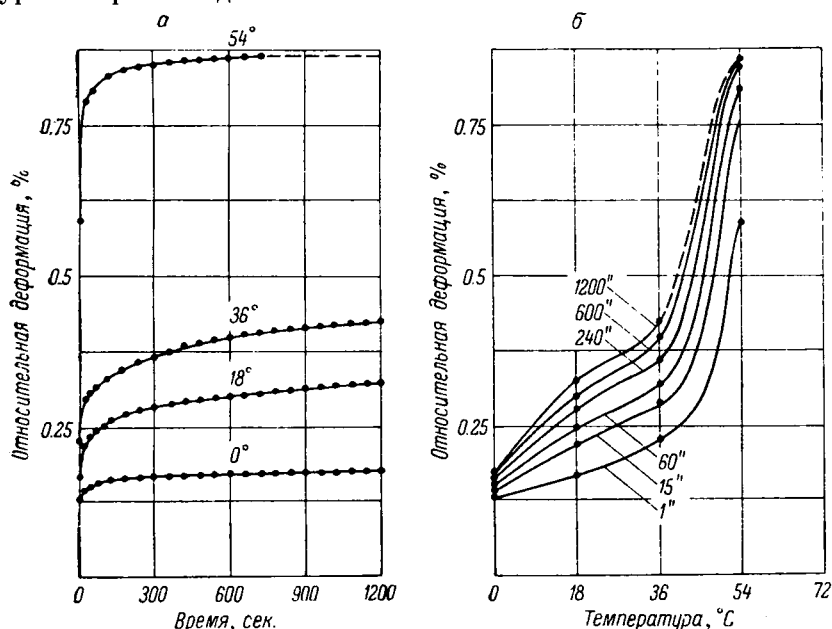


Рис. 7. Деформации при сжатии вдоль волокон в первой области набухшей древесины бука в высокоэластическом состоянии — в зависимости от времени действия нагрузки при разной температуре (а) и от температуры при разной продолжительности действия нагрузки (б).

Соответствующие зависимости были нами получены при сжатии вдоль волокон в первой области для набухшей древесины бука в высокоэластическом состоянии (предварительно была получена деформация во второй области до 4.3%), в диапазоне температур от 0 до 54° (рис. 7). Характерно очертание кривых изменения деформации во времени (рис. 7, а), наклон пологих участков которых сначала увеличивается (при повышении температуры от 0 до 18°), а затем уменьшается (при 36°), становясь почти незаметным (при 54°), что соответствует более быстрому падению скорости при более высокой температуре — 54°. Изображенный на рис. 7, б пучок кривых зависимости деформаций от температуры имеет резкий загиб вверх около 40°. Опыты должны быть продолжены для температур выше 54°.

6. В заключение можно отметить, что установлены два физических состояния древесины — застеклования и высокой эластичности, обуславливаемые двумя физическими состояниями ориентированной природной целлюлозы среднего слоя вторичных оболочек древесины. Натуральная древесина находится в состоянии естественного застеклования. Воздушно-сухая древесина при наложении силового поля во второй области (сжатие вдоль волокон) остается в состоянии застеклования, давая вынужденные

эластические деформации, характеризующиеся увеличением термообратимой остаточной деформации и некоторым снижением модуля упругости.

Набухшая древесина при наложении силового поля во второй области (сжатие вдоль волокна) выходит из естественного состояния застеклования, переходя в состояние высокой эластичности. Переход древесины в высокоэластическое состояние имеет следующие особенности: а) для его реализации одного повышения температуры и пластификации недостаточно, а необходимо действие во времени на набухшую древесину силового поля определенной интенсивности; б) переход в данных условиях устойчиво сохраняется; в) в результате этого перехода приобретает различную степень высокой эластичности, зависящая от доли высокоэластической деформации, полученной в процессе деформирования набухшей древесины во второй области.

В высокоэластическом состоянии древесина обладает вполне определенными устойчивыми свойствами, особенности которых обуславливаются большей, чем в состоянии застеклования, подвижностью звеньев и участков молекулярных цепей целлюлозы вторичных оболочек.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- А л е к с а н д р о в А. П. Морозостойкость высокомолекулярных соединений. Тр. 1-й и 2-й конф. по высокомолекулярным соед., Изд. АН СССР, 1945.
- А л е к с а н д р о в А. П., Ю. С. Л а з у р к и н. Высокоэластичная деформация полимеров. ЖТФ, т. 9, в. 14, 1939; ДАН СССР, т. XLIII, № 9, 1944.
- Б а р т е н е в Г. М. О двух процессах стеклования. ДАН СССР, т. 110, № 5, 1956.
- Д о г а д к и н Б. А. Химия и физика каучука. Госхимиздат, 1947.
- Ж у р к о в С. Н. Исследование механизма отвердевания полимеров. Тр. 1-й и 2-й Конф. по высокомолекулярным соед., Изд. АН СССР, 1945.
- И в а н о в Ю. М. Исследования прочности, пластичности и ползучести строительных материалов. Госстройиздат, 1954.
- И в а н о в Ю. М. О явлении высокой эластичности у набухшей древесины. ДАН СССР, т. 111, № 4, 1956.
- И в а н о в Ю. М. Эластическая деформация древесины. Коллоидный журн., т. 19, в. 3, 1957а.
- (И в а н о в Ю. М.) I v a n o v Yu. M. Phenomenon of High Elasticity in Swollen Wood. Composite Wood, v. 4, № 3, 1957b.
- И в а н о в Ю. М. Физические состояния и реологические свойства древесины. Сб. «Вопросы лесоведения и лесоводства», Изд. АН СССР, 1960.
- И в а н о в Ю. М., В. А. Б а ж е н о в. Исследования физических свойств древесины. Изд. АН СССР, 1959.
- К а р г и н В. А., Ю. М. М а л и н с к и й. Химия и физико-химия высокомолекулярных соединений. Изд. АН СССР, 1952.
- К о б е к о П. П., Е. В. К у в ш и н с к и й, Г. И. Г у р е в и ч. Исследование аморфного состояния. Изв. АН СССР, сер. физ., № 3, 1937.
- Л а з у р к и н Ю. С. Механические свойства полимеров в стеклообразном состоянии. Докторская диссертация. М., 1954.
- Л а з у р к и н Ю. С., Р. Л. Ф о г о л ь с о н. О природе больших деформаций высокомолекулярных веществ в стеклообразном состоянии. ЖТФ, т. 21, в. 3, 1951.
- М и х а й л о в Н. В., В. А. К а р г и н. Механизм упрочнения гидратцеллюлозных волокон. Тр. 4-й конф. по высокомолекулярным соед., Изд. АН СССР, 1948.
- М и х а й л о в Н. В., В. А. К а р г и н, В. М. Б у х м а н. Устойчивость ориентированных волокон целлюлозы. ЖФХ, т. 14, в. 2, 1940.
- М о с к а л е в а В. Е. Стресс древесины и его изменение при физических и механических воздействиях. Изд. АН СССР, 1957.
- О д и н ц о в П. Н. Набухание холоцеллюлозы ели в воде и концентрированной серной кислоте в присутствии сахаров. Тр. Инст. лесохоз. пробл. АН Латв. ССР, т. XII, 1957.
- B a i l e y I. W. Contributions to Plant Anatomy. Waltham, 1954.
- M a r k H. Natural and Synthetic Rubber. The Elasticity of Long-Chain Molecules. Nature, v. 141, 1938.

К ВОПРОСУ ЗАСТЕКЛОВАНИЯ ПРИРОДНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В ДРЕВЕСИНЕ

Ю. М. ИВАНОВ

В предыдущих работах (Иванов, 1956, 1957а, 1957б) мы приводили экспериментальные данные, показывающие, что при сжатии вдоль волокон набухшей древесины напряжением $\sigma > \sigma_{I-II}$ (σ_{I-II} — граница двух областей деформирования древесины) получены деформации относительной величиной до 10% первоначальной длины. При анализе этих результатов с учетом того, что измеряемые при сжатии вдоль волокон деформации древесины в основном обуславливаются деформациями высокоориентированной целлюлозы механических волокон (Иванов, 1953), был сделан вывод, что последняя в этих условиях (без повышения температуры) переходит из состояния естественного застеклования в высокоэластическое.¹ Переход этот постепенный, и степень высокой эластичности зависит от величины возникшей под действием силового поля высокоэластической деформации.² Высокоэластические свойства набухшей древесины сохраняются длительное время (также и после многократного высушивания и увлажнения), и указанный переход в высокоэластическое состояние носит в данных условиях устойчивый характер. Представляло интерес сравнить поведение такой древесины после ее высушивания с поведением натуральной древесины.

Описание и результаты экспериментов

Опыты проводились с древесиной, показавшей высокоэластические деформации и затем высушенной (далее именуется «древесина 2»). Методика экспериментов соответствовала описанной в предыдущих работах, с тем лишь исключением, что образцы при испытаниях находились в воздушной среде. Эти опыты показали, что рост деформаций такой древесины под действием напряжений $\sigma > \sigma_{I-II}$ происходит главным образом вследствие увеличения остаточной деформации (см. рисунок), характерного для вынужденной эластической деформации полимеров в стеклообразном состоянии. Остаточные деформации в значительной мере возвращаются при набухании. Следовательно, набухшая древесина, находившаяся в высокоэластическом состоянии, при высушивании теряет эластические свойства, переходя с уменьшением концентрации пластификатора в состояние застеклования. Однако эластические свойства полностью восстанавливаются набуханием, как это наблюдалось нами при многократном высушивании и увлажнении образцов древесины 2 в продолжение более двух лет.

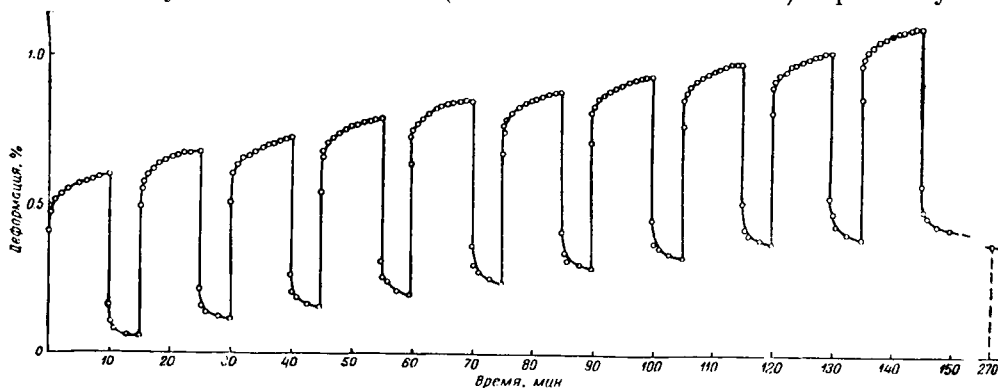
Древесина, показавшая высокоэластические деформации и затем высушенная (т. е. древесина 2), характеризуется иным поведением по сравнению с натуральной древесиной (именуемой древесиной 1) при механических воздействиях, прилагаемых в равных влажностных и температур-

¹ В дальнейшем для краткости этот термин мы будем относить к древесине.

² См. выше в этом томе трудов нашу статью «К исследованию высокоэластического состояния древесины».

ных условиях. Так, при одинаковом небольшом количестве пластификатора (воды) величина предела вынужденной эластичности σ_{I-II} у древесины 2 значительно меньше, чем у древесины 1. Например, у воздушно-сухой древесины 2 (влажность 11.8%) мы получили снижение σ_{I-II} на 30% по сравнению с древесиной 1 той же влажности.

Итак, исследования показали, что древесина, обнаружившая высокоэластические деформации в набухшем виде, будучи высушенной, теряет эластичность и застекловывается. При этом она приобретает определенные отличия в свойствах от натуральной сухой древесины. Эластические свойства у нее появляются (т. е. восстанавливаются) при набуха-



Деформации при сжатии вдоль волокон во второй области воздушно-сухой древесины бука, перешедшей в высокоэластическое состояние и затем высушенной (напряжение — 312 кг/см^2 , $\sigma_{I-II} = 250 \text{ кг/см}^2$, влажность 11.8%, температура 20.5°C).

нии в воде без наложения силового поля, предел вынужденной эластичности σ_{I-II} имеет сниженную величину.

Получается впечатление, что характер застеклования природной целлюлозы в древесине может быть двояким. В известной мере это явление перекликается с двумя механизмами застеклования полимеров (Каргин, Слонимский, 1948), отличаясь определенным своеобразием. Естественное застеклование наблюдается у натуральной древесины (древесина 1), причем выход из него не реализуется при одном набухании; необходимо еще приложение силового поля определенной интенсивности $\sigma > \sigma_{I-II}$, после чего и происходит постепенный переход в высокоэластическое состояние. В древесине же, находившейся в высокоэластическом состоянии и затем высушенной (древесина 2), возникает другого характера застеклование. Выход из него реализуется при увеличении концентрации пластификатора, без наложения силового поля, что напоминает аналогичную смену физических состояний у неориентированных полимеров при введении и удалении пластификатора.

Обсуждение результатов

Как известно, высокоэластическая деформация обуславливается перемещениями звеньев и участков цепей между узлами редко расположенных поперечных связей между линейными молекулами полимеров (Каргин, Слонимский, 1941). Поэтому появление у набухшей древесины высокоэластических деформаций не должно быть связано с какими-либо изменениями средней ориентации цепей целлюлозы. В данном случае речь может идти о поперечных связях в природной целлюлозе, обеспечивающих обра-

тимость высокоэластических деформаций и не диссоциирующих при набухании в воде.

Но если при появлении высокой эластичности сохраняется средняя ориентация цепей, то первоначальная ориентация звеньев, имеющаяся у натуральной древесины, напротив, постепенно, в условиях их теплового движения, вследствие возросшей подвижности нарушается. При достаточно большой доле высокоэластической деформации звенья должны иметь в значительной мере хаотическое расположение, при ориентированных в среднем цепях.

В процессе стеклования, происходящем при уменьшении концентрации пластификатора, сближении цепей и усилении межмолекулярного взаимодействия, эластические свойства постепенно теряются. Вследствие значительного увеличения времени релаксации и уменьшения подвижности звеньев фиксируется их беспорядочное расположение. Поэтому древесина 2 должна иметь дезориентированные звенья в отличие от древесины натуральной (древесина 1), имеющей высокую ориентацию звеньев. Не в этом ли заключается одно из существенных структурных отличий древесины 2 от древесины 1?

В условиях менее ориентированных и поэтому более подвижных звеньев ориентационные процессы в силовом поле будут осуществляться легче, вероятность определенного положения звеньев по отношению к направлению силового поля возрастет. В результате будет происходить более значительное снижение потенциального барьера вынужденной эластичности и ее предел окажется более низким.

Таким образом, анализ полученных экспериментальных данных о древесине 2 позволяет предполагать, что застеклование в ней природной целлюлозы характеризуется, по-видимому, взаимодействием дезориентированных звеньев, между полярными группами которых образуются физические связи, диссоциирующие набуханием в воде и восстанавливающиеся при высушивании.

В отличие от этого стеклование природной целлюлозы в натуральной древесине, как уже указывалось, не изменяется набуханием, и для выхода из него в высокоэластическое состояние требуется одновременное действие силового поля $\sigma > \sigma_{I-II}$. С другой стороны, после снятия силового поля высокоэластическое состояние устойчиво сохраняется.

Происходит это, по-видимому, потому, что снятие силового поля не может вернуть звенья в их первоначальное ориентированное положение, подвижность же их в тех же условиях максимального набухания не уменьшается. Поэтому снятие поля не приводит к возвращению утерянного состояния застеклования. Можно предполагать, что если тем или иным путем вернуть первичную ориентацию звеньев, то первоначальное состояние естественного застеклования должно, по-видимому, восстановиться.

Ориентация звеньев происходит одновременно с ориентацией цепей. Однако последняя может сохраняться при дезориентированных звеньях. Поэтому средняя ориентация цепей природной целлюлозы есть, по-видимому, необходимое условие застеклования, а ориентация звеньев должна быть для него достаточным условием.

Ориентация звеньев может устойчиво сохраняться благодаря образованию связей либо между соседними макромолекулами полимера, либо внутримолекулярных. При ориентации цепей происходит одновременно их выпрямление и сближение. Поэтому могут возникать как связи между макромолекулами, благодаря их сближению, так и внутримолекулярные связи, в результате поворота звеньев при выпрямлении цепей.

Возникает вопрос, могут ли в равной мере те и другие возникнуть в процессе ориентации и не быть подвержены диссоциации в результате одной лишь пластификации (набухание в воде), без приложения силового поля? Для ответа на этот вопрос необходимых данных пока нет. Можно лишь заметить, что для перехода натуральной древесины из состояния естественного застеклования в высокоэластическое необходимо одновременное выполнение двух условий: действие силового поля сжимающих напряжение $\sigma > \sigma_{I-II}$ и максимальное набухание. Следовательно, для реализации указанного перехода в силовом поле необходимо не только ослабление межмолекулярного взаимодействия, проявляющееся в начальной адсорбционной стадии набухания, но и происходящее при дальнейшем увеличении объема введенного пластификатора повышение подвижности звеньев цепей. Это важное обстоятельство дает основание предположить, что рассматриваемый переход может обуславливаться уменьшением жесткости цепей целлюлозы.

В качестве возможного механизма образования жестких цепей типа целлюлозы при стекловании выдвигалось создание мостиков между полярными радикалами внутри макромолекулы полимера (Каргин, 1952). При таком механизме стеклования переход натуральной древесины в высокоэластическое состояние можно представить себе как результат резкого уменьшения жесткости цепей вследствие разрушения в силовом поле внутримолекулярных связей природной целлюлозы.

Выводы

Проведенные опыты и их анализ позволяют высказать предположение о том, что существуют два вида стеклования природной целлюлозы.

По-видимому, застеклование древесины, показавшей высокоэластические деформации в набухшем виде и затем высушенной, происходит с образованием между дезориентированными звеньями цепей целлюлозы физических связей, диссоциирующих набуханием в воде и восстанавливающихся при высушивании.

Естественное застеклование натуральной древесины, обладающей ориентированными звеньями, должно, по-видимому, иметь иной механизм. Один из возможных его вариантов мыслим, например, в виде повышения жесткости цепей целлюлозы в результате образования связей внутри макромолекулы целлюлозы.

ЛИТЕРАТУРА

- Иванов Ю. М. Изменения микроскопического строения древесины в процессе ее деформирования и разрушения. Тр. Инст. леса АН СССР, т. 9, 1953.
- Иванов Ю. М. О явлении высокой эластичности у набухшей древесины. ДАН СССР, т. 111, № 4, 1956.
- Иванов Ю. М. Эластическая деформация древесины. Коллоидн. журн., т. 19, в. 3, 1957а.
- (Иванов Ю. М.) Ivanov Yu. M. Phenomenon of High Elasticity in Swollen Wood. Composite Wood, v. 4, № 3, 1957b.
- Каргин В. А., 1952, цит. по: Кобеко П. П. Аморфные вещества. Изд. АН СССР, 1952, стр. 211.
- Каргин В. А., Г. Л. Слонимский. Деформации высокополимерных материалов. ЖТФ, т. 11, в. 4, 1941.
- Каргин В. А., Г. Л. Слонимский. О деформациях аморфно-жидких линейных полимеров. ДАН СССР, т. 62, № 2, 1948.

ИЗМЕРЕНИЕ УПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ ДРЕВЕСИНЫ ИМПУЛЬСНЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ ¹

К. С. АЛЕКСАНДРОВ

Методы измерения упругих постоянных различных пород древесины являются в большинстве своем статическими методами, связанными с воздействием на материал значительных напряжений и под действием этих напряжений — изменением деформаций образцов. Между тем в настоящее время разработаны динамические методы измерения упругих модулей твердых тел, и некоторые из них могут быть применены к исследованию упругих свойств древесины. Одним из таких методов является импульсный ультразвуковой метод, основанный на измерении скорости распространения импульсов упругих волн высокой частоты в материале.

Цель настоящей работы — измерение некоторых упругих модулей двух пород древесины — дуба и ясеня импульсным ультразвуковым методом и сравнение полученных результатов с ранее опубликованными данными.

Упругие свойства древесины

Как показывают многочисленные эксперименты, древесина на периферии ствола с достаточным для практики приближением в отношении своих упругих свойств обладает симметрией ромбического кристалла, т. е. имеет девять независимых упругих модулей: c_{11} , c_{22} , c_{33} , c_{44} , c_{55} , c_{66} , c_{23} , c_{13} , c_{12} . Однако, насколько нам известно, из-за больших экспериментальных трудностей и недостаточной точности эксперимента количественных оценок степени такого приближения до сих пор не проводилось.

Для того чтобы определить все независимые упругие модули ромбического кристалла, достаточно измерить скорости распространения упругих волн сжатия, распространяющихся вдоль направлений кристаллографических осей; скорости волн сдвига вдоль тех же направлений и скорости трех квази-продольных волн, распространяющихся вдоль направлений биссектрис между кристаллографическими осями, т. е. вдоль направлений $[110]$, $[011]$, $[101]$, $[1]$.

В общепринятой установке за направления кристаллографических осей древесины принимаются ось ствола — Z , одно из радиальных направлений — X и периферийное тангенциальное направление — Y , ортогональное к первым двум.

Таким образом, зная скорости продольных волн в направлениях осей X , Y и Z , можно определить модули c_{11} , c_{22} , c_{33} соответственно по формулам вида

$$c_{ii} = \rho v^2; \quad i = 1, 2, 3, \dots, 6. \quad (1)$$

где ρ — плотность материала, v — скорость ультразвуковой волны. Модули сдвига, определение которых другими методами затруднительно,

¹ Автор приносит глубокую благодарность В. А. Баженову за предложенную тему работы и за обсуждение результатов ее.

также могут быть найдены по формуле (1) из измерений скоростей сдвиговых упругих волн вдоль осей X , Y , Z .

Согласно классической теории упругости, у ромбического кристалла скорость волны сдвига, распространяющейся вдоль оси i и имеющей направление смещения частиц в волне по оси k , т. е. v_{ik} , должна быть равна скорости волны, распространяющейся по k со смещением по i , т. е. v_{ki} . Иными словами, в ромбическом кристалле должны выполняться соотношения:

$$\begin{aligned} v_{xy} &= v_{yz} = [c_{44}/\rho]^{1/2}, \\ v_{xz} &= v_{zx} = [c_{55}/\rho]^{1/2}, \\ v_{xy} &= v_{yx} = [c_{66}/\rho]^{1/2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Справедливость этих соотношений доказана для реальных ромбических кристаллов с большой точностью. Проверка соотношений (2) на примере древесины позволит судить о степени приближения упругих свойств древесины к свойствам ромбического кристалла.

Модули c_{23} , c_{13} , c_{12} не могут быть измерены непосредственно импульсным ультразвуковым методом и определяются по сложным формулам из данных измерений скоростей квази-продольных волн в направлениях $[110]$, $[011]$, $[101]$. Точность определения этих модулей значительно ниже, чем модулей c_{ii} , так как в погрешность измерения входят и погрешности измерения остальных модулей.

Метод измерения скорости упругих волн

Принцип работы импульсной ультразвуковой установки для измерения скорости распространения упругих волн заключается в сравнении времени прохождения ультразвуковой волны через образец данной длины и через

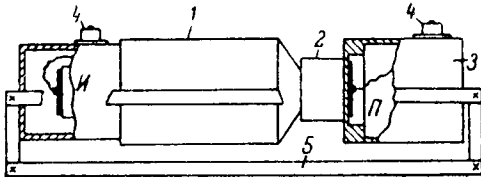


Рис. 1. Измерительное устройство.

I , II — излучающая и приемная пластинки кварца; 1 , 3 — металлические стержни; 2 — образец; 4 — фишки для подведения высокочастотных сигналов; 5 — параллельные направляющие.

столб жидкости, скорость звука в которой известна (2). Используемая в работе установка состоит из импульсного генератора, приемника и осциллографического блока. Основные измерительные приспособления — измерительное устройство и жидкостная линия задержки показаны на рис. 1 и 2. С помощью пьезоэлектрической кварцевой пластинки I ультразвуковой импульс частотой 1.67 мгц посылается в металлический стержень 1 , проходит через испытываемый образец 2 и принимается приемной пластинкой кварца II (рис. 1). Одновременно с этим импульсом в жидкостную линию задержки посылается импульс той же частоты. Расстояние между излучающей пластинкой I и приемной пластинкой 2 в жидкости может изменяться с помощью микрометрического винта δ (рис. 2). После прохождения через измерительное устройство и жидкостную линию задержки оба импульса подаются на выход усилителя, а затем на экран электронно-лучевой трубки. При перемещении микрометрического винта δ импульс, прошедший через жидкость, может перемещаться по экрану прибора и может быть совмещен с импульсом, прошедшим через измерительное устройство. В этом

случае время прохождения импульсов по двум акустическим путям одинаково.

Процесс измерения скорости звука в образце состоит из двух последовательных совмещений импульсов на экране прибора. В первый раз импульсы совмещаются, когда образец 2 не помещается в измерительное устройство и металлические стержни 1 и 3 соприкасаются друг с другом (рис. 1). Совмещение импульсов происходит при некотором положении микрометрического винта N_1 . Если поставить в измерительное устройство испытуемый образец и затем вновь совместить импульсы на экране прибора путем перемещения микрометрического винта, то совмещение произойдет при ином положении винта N_2 , поскольку время прохождения ультразвука через измерительное устройство изменилось за счет добавления времени прохождения через образец. Таким образом, зная длину образца l , скорость звука в жидкости v_0 и разность двух отсчетов по микрометрическому винту $N_2 - N_1$, можно определить искомую скорость звука в образце v по формуле

$$v = v_0 \frac{l}{N_2 - N_1} \quad (3)$$

Результаты измерений

В нашем распоряжении были образцы двух пород древесины — ясеня и дуба, вырезанные перпендикулярно осям X, Y и Z и имевшие размеры 5—7 и 10 мм в направлении этих осей и 20×20 мм в поперечных направлениях. На этих образцах невозможно было измерить величины модулей c_{23} , c_{13} , c_{12} , и мы ограничились лишь измерением модулей c_{ii} ($i=1-6$). Данные измерений и расчетов скоростей распространения упругих волн, величины разброса значений скоростей от образца к образцу и средние значения упругих модулей этих пород древесины приведены в табл. 1 и 2.

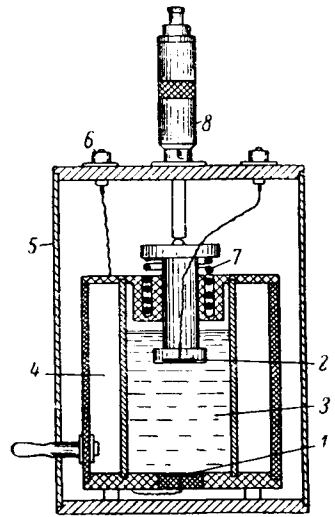


Рис. 2. Жидкостная линия задержки.

1, 2 — пластинки кварца; 3 — эталонная жидкость; 4 — термомост; 5 — кожух; 6 — фишки; 7 — возвратная пружина; 8 — микрометрический винт.

Модули упругости древесины дуба

Т а б л и ц а 1

Модуль	Направление распространения волны	Направление смещения в волне	Количество образцов	Разброс значений скорости звука, м/сек.	Среднее значение v	Модуль упругости, в 10^{-10} дин/см ²
c_{11}	X	X	13	2380±2230	2310±70	3.64±0.2
c_{22}	Y	Y	7	1830±1740	1780±40	2.17±0.08
c_{33}	Z	Z	14	5450±4830	5140±290	18.1±1.8
c_{44}	Z	Y	10	1370±1330	1350±20	} 1.23±0.05
	Y	Z	5	1360±1300	1330±30	
c_{55}	X	Z	6	1610±1560	1580±20	} 1.73±0.05
	Z	X	10	1650±1520	1590±70	
c_{66}	Y	X	5	1065±960	1010±50	} 0.67±0.07
	X	Y	6	1030±930	980±50	

Таблица 2

Модули упругости древесины ясеня

Модуль	Направление распространения волны	Направление смещения в волне	Количество образцов	Разброс значений скорости звука, м/сек.	Среднее значение ν	Модуль упругости, в 10^{-10} дин/см ²
c_{11}	X	X	15	2430 ± 2290	2360 ± 70	4.69 ± 0.25
c_{22}	Y	Y	14	2040 ± 1990	2020 ± 20	3.42 ± 0.08
c_{33}	Z	Z	15	5750 ± 5350	5550 ± 200	26.0 ± 2.0
c_{44}	Z	Y	10	1390 ± 1330	1360 ± 30	} 1.61 ± 0.08
	Y	Z	7	1450 ± 1340	1400 ± 50	
c_{55}	X	Z	10	1560 ± 1490	1530 ± 30	} 2.01 ± 0.08
	Z	X	10	1575 ± 1525	1550 ± 25	
c_{66}	Y	X	7	1080 ± 1030	1050 ± 20	} 0.86 ± 0.03
	X	Y	7	1020 ± 980	1000 ± 20	

В табл. 3 полученные нами значения сравниваются с данными измерений других авторов.

Из табл. 3 видно, что наши значения упругих модулей древесины гораздо выше, чем данные статических измерений, проведенных другими авторами. Большие расхождения в результатах измерений могут быть обусловлены, с нашей точки зрения, двумя причинами. Прежде всего в наших измерениях образцы рассматриваются как бесконечная среда,

Таблица 3

Модули упругости древесины, в кг/см²

Материал	c_{11}	c_{22}	c_{33}	c_{44}	c_{55}	c_{66}	c_{23}	c_{13}	c_{12}	Автор
Дуб.	305	138	682	80	129	40	103	150	103	Александров и Носиков, 1956. Леонтьев, 1952. Митинский, 1948. Наши измерения.
	203	97	949	85	120	50	76	114	80	
	307	144	763	—	—	—	112	168	119	
	370	219	1840	125	176	68	—	—	—	
Ясень.	219	116	1730	100	131	28	99	146	85	Митинский, 1948; Леонтьев, 1952; Александров и Носиков, 1956. Наши измерения.
	475	348	2560	164	205	88	—	—	—	

из-за большой площади образцов и высокой частоты упругих колебаний, что справедливо, конечно, с некоторым приближением. Во-вторых, при измерениях упругих постоянных статическими методами используются относительно большие образцы, упругие свойства которых могут определяться свойствами наиболее слабого участка. В наших измерениях образцы меньше, т. е. однороднее, а влияние возможных неоднородностей может сказаться лишь в виде небольших поправок к измеряемым значениям скоростей.

Основным результатом работы мы считаем прямое подтверждение правильности положения о том, что упругие свойства древесины могут рассматриваться как свойства ромбического кристалла. Действительно, из табл. 1 и 2 видно, что на большом числе образцов удовлетворяются соотношения (2), характеризующие ромбический кристалл. Некоторый

разброс результатов измерений от образца к образцу выходит за пределы ошибок измерения и, видимо, обусловлен наличием кривизны годичных слоев в имевшихся образцах.

В заключение отметим, что предложенный импульсный метод определения упругих постоянных из-за плохого прохождения ультразвука столь высокой частоты через древесину может быть использован лишь для измерений упругих свойств в плотных породах древесины. Этот метод может представлять интерес для измерений на редких породах древесины, поскольку он требует относительно малых образцов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- А л е к с а н д р о в К. С. и О. В. Н о с и к о в. Прибор для определения показателей упругости кристаллов. Акуст. журн., т. 2, 1956.
Л е о п т ь е в Н. Л. Упругие деформации древесины. Гослесбумиздат, 1952.
М и т и н с к и й А. Н. Упругие постоянные древесины как ортотропного материала. Тр. Ленингр. лесотехн. акад. им. С. М. Кирова, № 63, 1948.
-

К ВОПРОСУ О ДЕФОРМАТИВНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ПРИ СЖАТИИ ПОПЕРЕК ВОЛОКОН

Н. Н. КРАСУЛИН

При исследовании деформативности малых образцов древесины, работающих на сжатие поперек волокон, кривизной годичных слоев обычно пренебрегают. Древесина рассматривается как ортотропный материал с различными свойствами в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Вместе с тем наблюдения за деформируемостью древесины в процессе нагружения образцов указывают на значительное изменение начальной кривизны годичных слоев, которая при тангенциальном сжатии увеличивается, а при радиальном — уменьшается.

Для изучения зависимости между сжимающими напряжениями и изменением кривизны годичных слоев при сжатии древесины сосны поперек волокон в лаборатории испытания сооружений Новочеркасского политехнического института было осуществлено описываемое ниже экспериментальное исследование.

Методика испытаний

Образцы, размерами $4 \times 4 \times 4$ см, были вырезаны из одной сосновой прямослойной доски, причем одна из сторон образца являлась хордой дуг годичных слоев. Было изготовлено две серии образцов с различной влажностью. В каждой серии испытывалось четыре образца — два на тангенциальное сжатие, два — на радиальное. Влажность образцов первой серии составляла 9—10%, второй — около 20%.

У каждого образца определялись объемный вес, влажность, процент поздней древесины, число годовых слоев в 1 см и начальный радиус кривизны (табл. 1).

При определении радиуса кривизны предполагалось, что годичные слои представляют собой дуги концентрических окружностей, а радиус r связан с хордой b (ширина образца) и стрелой f соотношением

$$r = \frac{b^2}{8f} + \frac{f}{2}. \quad (1)$$

Величины b и f измерялись штангенциркулем с точностью до 0.1 мм. С такой же точностью вычислялся и радиус.

Образцы испытывались на прессе ИМ-4а, имеющем крупномасштабный диаграммный аппарат. Нагрузка прикладывалась ступенями через 200 кг. Скорость деформирования образца в процессе нагружения соответствовала скорости перемещения подушки пресса. Время выдерживания образца после достижения каждой ступени нагрузки не превышало 3 минут. Во время останова нагружения производились фотосъемки торцовых поверхностей образца.

После испытания определялись: а) условный предел прочности (ГОСТ-6336—52); б) временное сопротивление образцов, работающих на тангенциальное сжатие; в) граница перехода ко второй фазе деформиро-

вания у образцов, работающих на радиальное сжатие (Баженов и др., 1953); г) радиус кривизны деформированного образца; д) влажность. Результаты приведены в табл. 2.

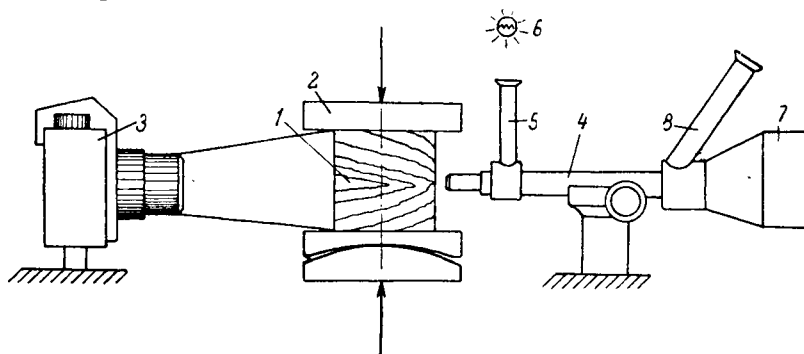


Рис. 1. Установка для фотографирования образца в процессе приложения напряжения.

1 — образец; 2 — пресс; 3 — фотокамера «Зенит-С»; 4 — поляризационный микроскоп МПЗ; 5 — опалилюминатор с устройством для поляризации света; 6 — источник освещения; 7 — микрофотонасадка; 8 — устройство для визуального наблюдения.

Для выявления изменения радиуса кривизны годичных слоев при нагружении образцы №№ 1, 3, 5 и 7 фотографировались фотокамерой «Зенит-С» с насадочными кольцами после достижения каждой ступени нагру-

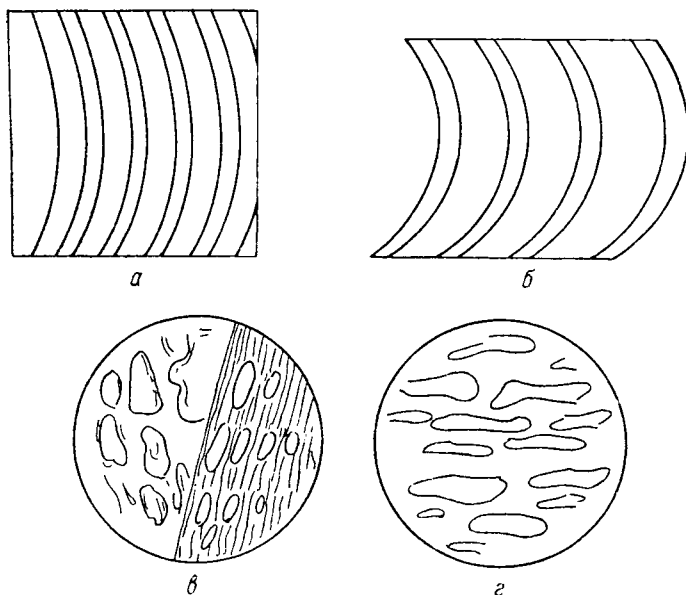


Рис. 2. Образцы — до и после испытания.

а — образец № 5 до разрушения; б — образец № 5 после разрушения; в — характер разрушения клеток при тангенциальном сжатии; г — характер разрушения ранней древесины при радиальном сжатии.

жения. Установка для съемок показана на рис. 1, а снимки образцов до и после испытания — на рис. 2, а и б.

Для анализа деформаций клеток древесины при работе под нагрузкой и при разрушении было произведено микрофотографирование торцовых

Таблица 1

Результаты испытания древесины сосны на сжатие поперек волокон

№ образца	Размеры, см			Площадь, см ²	Объем V, см ³	Вес G, г	Объемный вес, г/см ³	Влажность, W, %	Поводная древесина, %	Число годовых слоев в 1 см	Начальный радиус кривизны, см	Радиус кривизны после испытания, см	Временное сопротивление, кг/см ²	Условный предел прочности, кг/см ²
	H	R	T											
1т	3.83	3.83	3.85	14.85	57.15	27.99	0.488	9.80	27.5	3	9.09	3.32	89.0	57.9
2т	3.76	3.86	3.88	14.47	56.05	27.45	0.490	9.72	27.9	3	9.82	3.43	88.7	59.2
3	3.80	3.86	3.86	14.65	56.45	28.20	0.498	9.78	26.1	3	10.30	14.30	59.3 *	47.8
4	3.77	3.86	3.83	14.45	55.75	27.77	0.500	3.77	27.3	3	9.85	13.70	61.6 *	46.9
5т	3.82	3.86	3.87	14.75	57.75	30.60	0.536	20.45	25.3	3	11.00	3.42	61.5	44.1
6т	3.80	3.86	3.85	14.68	56.50	30.42	0.539	20.15	25.6	3	11.32	3.36	60.8	47.2
7	3.85	3.87	3.86	14.85	57.35	30.95	0.540	20.22	25.4	3	10.20	15.10	45.1 *	37.7
8	3.83	3.89	3.89	14.85	57.75	31.21	0.538	20.58	26.3	3	10.10	15.35	44.3 *	36.9

Примечание. Предел прочности, отмеченный *, является границей перехода ко второй фазе.

граней образцов в отраженном поляризованном свете. Съёмки велись микроскопом МП-3 с опакиллюминатором и микрофотонасадкой. Поверхность образца обрабатывалась по известной методике (Иванов, 1953). Наименьший блеск поверхности обеспечивался соответствующим подбором углов поляризации тубуса и опакиллюминатора.

Обработка результатов испытаний

Благодаря примененной методике фотографирования образцов в процессе нагружения оказывается возможным производить измерение элементов макростроения древесины непосредственно на фотографических отпечатках, причем точность измерений при применении оптического увеличения возрастает. При обработке фотографических снимков

Таблица 2

Результаты испытаний образцов на прессе ИМ-4а

Напряженье σ , кг/см ²	Радиус кривизны r, см	Относительное удлинение, %		Напряженье σ , кг/см ²	Радиус кривизны r, см	Относительное удлинение, %	
		ϵ_r	ϵ_t			ϵ_r	ϵ_t
Образец № 1				Образец № 5			
0.00	9.09	0.00	0.00	0.00	11.00	0.00	0.00
13.47	8.86	0.31	0.55	13.55	10.20	0.20	0.71
26.95	8.55	0.61	1.41	27.10	8.90	0.63	1.41
40.40	7.60	1.23	2.50	40.70	7.20	1.56	4.23
58.70	6.72	1.52	3.92	61.50	3.42	1.90	9.12
89.00	3.32	1.57	7.42	—	—	—	—
Образец № 3				Образец № 7			
0.00	10.50	0.00	0.00	0.00	10.20	0.00	0.00
13.65	11.00	1.40	0.65	6.73	10.50	0.40	0.20
27.30	12.05	3.05	1.25	13.47	10.80	1.50	0.60
40.90	13.30	5.20	1.95	26.95	11.70	3.70	1.40
59.00	14.30	12.80	4.30	38.70	13.30	6.10	2.20
—	—	—	—	45.10	15.10	11.70	5.90

увеличение было четырехкратным, а измерения производились штангенциркулем с точностью до 0.1 мм.

Следует отметить, что предварительная разметка поверхности исследуемого образца может повысить эффективность предлагаемого метода изучения деформативности древесины.

В результате испытания получены фотоснимки, соответствующие каждой ступени нагрузки образцов №№ 1, 3, 5 и 7, на которых произведены измерения высоты, ширины и стрелки дуги среднего годичного слоя. По полученным данным вычислялись относительные деформации E_R и E_t и радиус кривизны слоев по формуле (1). Результаты вычислений сведены в табл. 2, по данным которой построены графики (рис. 3).

Анализ полученных результатов

1. **Тангенциальное сжатие.** При тангенциальном сжатии кривизна годичных слоев начинает увеличиваться сразу после приложения нагрузки. По мере приближения к условному пределу прочности кривизна резко возрастает (рис. 3, а). Радиус кривизны после испытания составляет 30—35% от первоначального. Аналогично изменяется высота образца. Относительное укорочение после испытания составляет 7—9%. Иначе обстоит дело с изменением ширины образца (уширением). При росте напряжений до условного предела прочности ширина образца постепенно увеличивается, затем, по мере дальнейшего увеличения напряжений, ширина почти не меняется, а образец деформируется за счет изгиба годичных слоев, потерявших устойчивость. Относительное уширение достигает 1.5—2%.

Качественных различий между деформативностью сухой и влажной древесины не наблюдается.

Микрофотография разрушенной зоны образца (рис. 2, в) указывает на значительные деформации сдвига, возникающие на границе ранней и поздней зон годичного слоя.

2. **Радиальное сжатие** (рис. 3, б). При радиальном сжатии кривизна годовых слоев уменьшается, причем изменение кривизны по мере приближения к условному пределу прочности происходит замедленно. Относительное изменение кривизны при радиальном сжатии значительно меньше, чем при тангенциальном. Радиус кривизны возрастает на 30—50% по сравнению с первоначальным.

Линейные деформации образца, работающего на радиальное сжатие, плавно возрастают, увеличивая интенсивность роста при напряжениях, превышающих условный предел прочности. Относительное укорочение достигает 13%, относительное уширение — 4—6%.

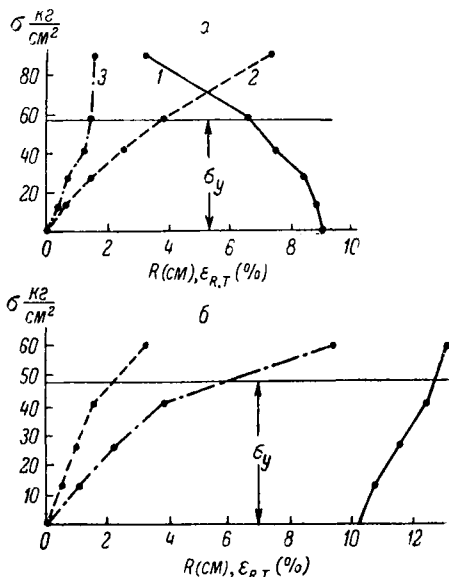


Рис. 3. Характер деформативности и изменение радиуса кривизны при нагружении образцов древесины сосны.

а — сжатие в тангенциальном направлении (образец № 1); б — сжатие в радиальном направлении (образец № 3). 1 — радиус кривизны в см; 2 — относительные деформации в тангенциальном направлении; 3 — то же в радиальном направлении.

В целом характер деформативности образцов из сухой и влажной древесины схож, но у влажных образцов деформации несколько больше.

Микрофотоснимки древесины, находящейся в напряженном состоянии (рис. 2, з), показывают, что разрушение образцов происходит за счет потери устойчивости стенок отдельных клеток ранней древесины и сдвигов, которые также наблюдаются при сжатии поперек волокон в радиальном направлении.

Выводы

1. Кривизна годичных слоев в процессе нагружения образцов при тангенциальном сжатии неуклонно возрастает, при радиальном — уменьшается. При напряжениях, превышающих условный предел прочности, кривизна годичных слоев образцов, работающих на тангенциальное сжатие, резко возрастает, на радиальное — незначительно уменьшается.

2. Начальная кривизна годовых слоев является причиной сдвигающих напряжений как при тангенциальном, так и при радиальном сжатии поперек волокон.

3. При тангенциальном сжатии начальная кривизна ухудшает условия работы образца — вызывает изгибающий момент и может привести к расслаиванию отдельных слоев.

4. При радиальном сжатии начальная кривизна вызывает сдвигающие напряжения на границах между ранней и поздней зонами, которые, разрушая клетки ранней древесины, влияют на прочность всего образца.

ЛИТЕРАТУРА

- Баженов В. А., Л. М. Перелыгин, Е. А. Семенова. Об испытании древесины на сжатие поперек волокон. Тр. Инст. леса АН СССР, т. IX, 1953.
Иванов Ю. М. Изменения микроскопического строения древесины в процессе ее деформирования и разрушения. Тр. Инст. леса АН СССР, т. IX, 1953.
-

ИССЛЕДОВАНИЕ НАБУХАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Ю. М. ИВАНОВ

В наших предыдущих работах была обоснована и исследована методика измерения давления набухания по принципу реакции упругого элемента, позволяющая определить как величину давления набухания, так и его кинетику (Иванов, 1953а, 1956; Иванов и Баженов, 1959). Исследованиями на приборе, в котором крайняя опора рычага для удобства установки образцов была выполнена в виде шарикоподшипника, подтверждена возможность измерения давления набухания с достаточной точностью и сравнительно быстро, например для заболони сосны в течение нескольких минут. Это позволило провести дальнейшие исследования давления набухания p_n , некоторые результаты которых здесь вкратце излагаются. Приводятся также данные о деформации разбухания поперек волокон, полученные для той же древесины в одинаковых условиях.

1. Согласно осмотической теории, давление набухания должно возрастать с повышением температуры. Однако в действительности, например у целлюлозы, этого не наблюдается. Так, набухание целлюлозы в щелочах с повышением температуры падает (Никитин, 1951).

Для древесины данные о влиянии температуры на величину давления набухания до настоящего времени отсутствовали. С целью восполнения этого пробела мы провели эксперименты с определением давления набухания и деформации разбухания древесины бука и заболони сосны в воде при разной температуре. Давление набухания древесины бука составило 38.7 кг/см² (среднее для 12 образцов) при 20° и 18.2 кг/см² (среднее для 8 образцов) при 85° С, т. е. при повышении температуры с 20 до 85° давление падает вдвое, а время до максимума — более чем в 15 раз. Давление набухания заболони сосны составило 19.8 кг/см² (среднее для 5 образцов) при 19° и 9.4 кг/см² (среднее для 6 образцов) при 84° С, т. е. также упало вдвое. Таким образом, у древесины давление набухания с повышением температуры падает, причем достижение максимального давления значительно ускоряется (рис. 1). В то же время деформация разбухания поперек волокон при повышении температуры не показывает заметного изменения (рис. 2), хотя время до максимума ее заметно сокращается.

Сокращение времени до максимума давления набухания и деформации разбухания объясняется здесь, по-видимому, увеличением скорости диффузии молекул воды в полимер с повышением температуры (Журков, Рыскин, 1954).

В опытах при комнатной температуре было отмечено, что процесс водопоглощения обгоняет набухание (Иванов, 1953а). Объясняется это тем, что в начальный момент скорость водопоглощения максимальна, а деформация разбухания и давление набухания имеют нулевую скорость (Иванов, 1953а). С повышением температуры это положение меняется, что видно на полученных нами для древесины заболони сосны диаграммах, построенных в увеличенном масштабе времени (рис. 3): при 85° С наблюдается значительное увеличение скорости деформации разбухания и давления набухания, с максимумом в начальный момент (это имеет место

и при набухании в глицерине при 150°C — см. рис. 10). В этом, очевидно, также проявляется влияние на кинетику набухания увеличения при повышении температуры скорости диффузии молекул воды в межмолекулярные пространства целлюлозы.

Падение давления набухания древесины при повышении температуры, полученное в описанных опытах, указывает здесь также на решающую

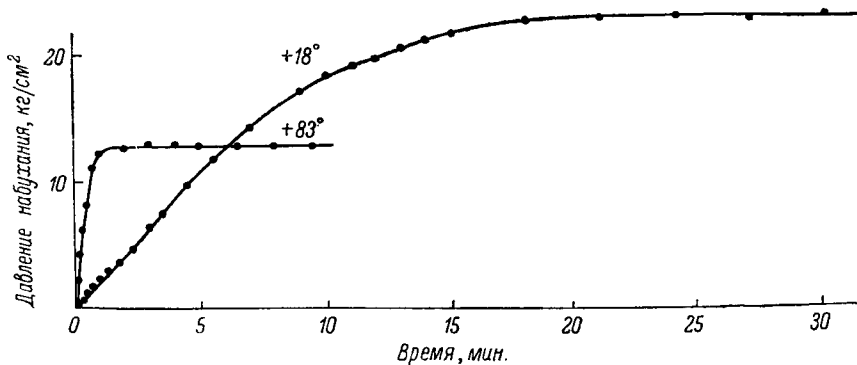


Рис. 1. Кинетика давления набухания поперек волокон древесины заболони сосны в воде при $+18^{\circ}$ и $+83^{\circ}\text{C}$.

роль целлюлозы вторичных оболочек, обуславливающих анизотропию деформаций набухания древесины.

Ограниченное набухание целлюлозы находит свое объяснение в теории, рассматривающей набухание аморфного полимера в низкомолекулярном

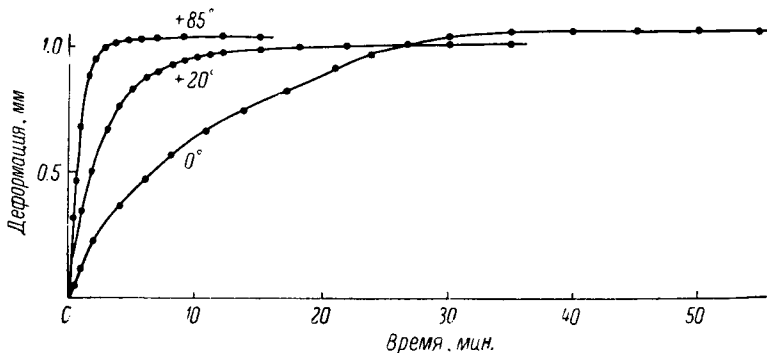


Рис. 2. Кинетика деформации разбухания поперек волокон в тангенциальном направлении древесины заболони сосны в воде при 0° , $+20^{\circ}$ и 85°C .

растворителе как смешение жидкостей и образование истинного раствора, с компонентами в строго определенном соотношении, по достижении которого дальнейшее увеличение степени набухания прекращается (Тагер, Каргин, 1941). При этом кинетика процесса существенным образом определяется скоростью взаимной диффузии растворителя и полимера. В начале набухания малые молекулы первого быстро проникают в полимер и им поглощаются. В рассматриваемом случае имеет место ограниченное набухание аморфного анизотропного полимера (целлюлоза вторичных оболочек) в низкомолекулярной жидкости (вода).

При набухании древесины мы имеем падение давления набухания с повышением температуры, постоянную максимальную величину поперечной деформации при продольной деформации, зависящей от температуры, а иногда и меняющей знак.¹ Таким образом, здесь появляется ряд новых особенностей, которые вряд ли могут быть объяснены без рассмотрения роли структурных элементов анизотропного полимера, в данном случае — вы-

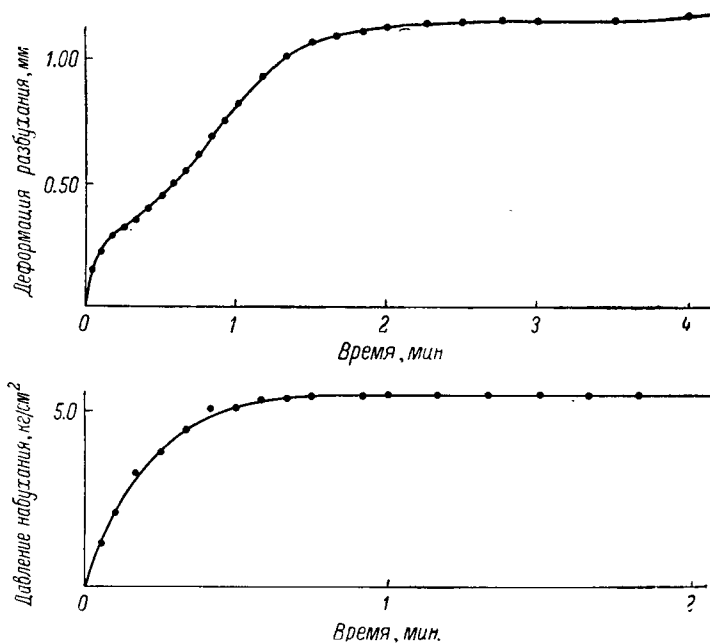


Рис. 3. Кинетика деформации разбухания и давления набухания древесины заболони сосны поперек волокон в воде при $+85^{\circ}\text{C}$.

коориентированной целлюлозы среднего мощного слоя вторичных оболочек, обуславливающей анизотропию набухания древесины.

Можно предполагать, что наблюдающаяся у поздней древесины сосны и у древесины бука перемена знака продольной деформации соответствует двум стадиям набухания. В первой стадии, являющейся стадией истинной адсорбции (Каргин, Гатовская, 1956), происходит уменьшение сил взаимодействия между макромолекулами полимера. Механизм уменьшения межмолекулярного взаимодействия в первой стадии у полярных полимеров объясняется экранированием молекулами пластификатора полярных групп полимера (Журков, 1945; Каргин, Малинский, 1952). Вследствие этого должно, очевидно, происходить расширение структуры.

Макромолекулы целлюлозы (или пакки из нескольких макромолекул) в древесине представляют собой изогнутые нити, несколько вытянутые в среднем по направлению продольной оси фибрилл. При основном расширении в поперечном направлении составляющая его будет наблюдаться в виде удлинения в продольном направлении. Этим можно, по-видимому, объяснить наблюдающееся при набухании сухой древесины удлинение вдоль волокон.

¹ См. ниже в этом томе нашу статью «Удлинение и укорочение древесины вдоль волокон при набухании».

Вторая стадия связана с возрастанием концентрации пластификатора, в данном случае воды, увеличением числа молекул ее между соседними макромолекулами целлюлозы, разрывом водородных связей и вызываемым этим дальнейшим увеличением среднего расстояния между макромолекулами. При достижении некоторой, сравнительно большой величины поперечного расширения появляется продольное укорочение, что мы и видим у поздней древесины сосны и у древесины бука.²

Как известно, явление продольного укорочения наблюдается при набухании хлопковых волокон в растворах щелочи (Никитин, 1951; Одинцов, 1957б). Естественно предположить, что то же самое явление в уменьшенном размере проявляется и при набухании в воде поздней древесины сосны и у древесины бука.

Механизм продольного укорочения недостаточно исследован. Возможно, что он состоит в проявлении влияния винтового расположения фибрилл в среднем мощном слое вторичных оболочек. Расширение фибрилл в результате набухания происходит в основном в поперечном направлении и имеет следствием расширение поперечного сечения волокна и увеличение его периметра. Так как длина фибрилл изменяется незначительно, то при этом должно происходить укорочение волокна. Против такого предположения имеется возражение. Необходимым условием сокращения длины волокна является взаимный сдвиг соседних фибрилл, который в действительности не происходит, так как монолитность волокна при набухании не нарушается.

Имеется еще ряд предположений, в основном сводящихся к механической модели типа ножниц (Valko, 1937). Однако они, как нетрудно видеть, не могут объяснить отмеченную выше перемену знака продольной деформации.

Продольное укорочение наблюдается во второй стадии, при значительной степени набухания, т. е. в условиях повышения подвижности звеньев и цепей целлюлозы. Можно высказать предположение, что в условиях известной подвижности цепей дальнейшее расширение структуры в поперечном направлении может вызвать их стягивание в перпендикулярном направлении, вдоль ориентации, т. е. продольное укорочение. Стягивание цепей в данном случае может быть объяснено влиянием поперечных сетчатых связей целлюлозы.

В литературе имеются указания на поперечные связи целлюлозы как на связи, фиксирующие взаимное расположение макромолекул целлюлозы (Михайлов, Каргин, Бухман, 1940). Существование таких связей подтверждается обнаруженным фактом высокоэластических деформаций у целлюлозы вторичных оболочек древесины.³ В данном случае имеются в виду связи, не диссоциирующие при набухании в воде. Сетчатые связи, вызывая сначала появление продольного укорочения, в последующем, при приближении к максимуму набухания, должны, по-видимому, ограничивать дальнейшее поперечное расширение, а тем самым — и продольное укорочение. Таким образом, адсорбционная стадия всегда достигает своего полного развития, осуществимого при данной температуре, вторая же стадия оказывается недоразвитой, так как вырождается вследствие ограничений, накладываемых поперечными связями.

² См. нашу статью «Удлинение и укорочение древесины. . .», где показано, что в этом случае деформации при набухании цельной древесины заболони сосны в основном обуславливаются деформациями поздней зоны годовичных слоев.

³ См. выше в этом томе нашу статью «К исследованию высокоэластического состояния древесины».

Известное подтверждение высказанного предположения мы видим в непосредственной зависимости величин не только равновесного модуля, но и предела набухания (Догадкин, Резниковский, 1955) от возникновения пространственной структуры при образовании поперечных связей у линейных полимеров (вулканизированный каучук).

Следует, однако, учитывать, что в древесине имеется система слоев с различным направлением ориентации. Первая адсорбционная стадия, по-видимому, будет развиваться во всех слоях, независимо от направления ориентации. То же следует предполагать и в отношении начала и некоторого развития второй стадии, когда начинает проявляться влияние стягивания цепей, вызывающего продольное укорочение древесины.

Однако при приближении к максимуму набухания во второй стадии поперечному расширению среднего мощного слоя вторичных оболочек

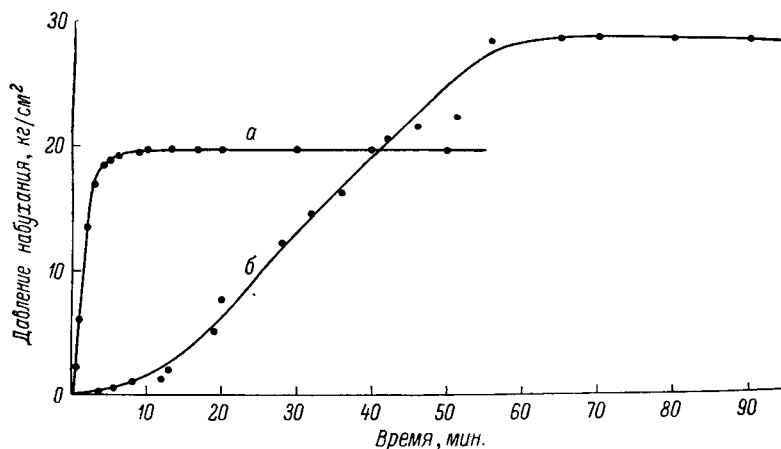


Рис. 4. Кинетика давления набухания в ранней (а) и поздней (б) древесине ядра сосны поперек волокон в воде при 20° С.

должна, по-видимому, препятствовать и тонкая первичная оболочка (см., например, Одинцов, 1957б, 1957в), имеющая поперечное направление ориентации, в котором она мало растяжима. Возможно, именно влиянием сетчатых связей и первичной оболочки объясняется постоянство поперечной деформации разбухания древесины при изменении температуры.

Влияние температуры на давление набухания древесины, которое падает с повышением первой, объясняется, по-видимому, тем, что решающую роль здесь играет первая стадия набухания, поскольку максимум давления набухания достигается значительно раньше, чем максимум деформации поперечного разбухания, связанный с завершением второй стадии набухания (см. ниже, пункт 5).

2. Ранее было установлено, что в заболони сосны давление набухания достигает максимальной величины значительно быстрее в ранней зоне — 35 сек., чем в поздней — 140 сек. (Иванов, 1956; Иванов и Баженов, 1959), хотя смолистость ранней зоны обычно больше (Жеребов, 1953). Возможно, что большую скорость набухания ранней зоны следует отнести за счет большего содержания в ней пентозанов, на что указывает Одинцов (1957а).

Интересно было проверить, соблюдается ли такое же соотношение в кинетике давления набухания в ядре сосны. Опыты с набуханием в воде

при 17° поздней и ранней древесины ядра сосны на образцах таких же размеров, как и в опытах с заболонью, показали, что и в случае ядра сосны давление набухания (рис. 4) достигает максимальной величины значительно быстрее в ранней древесине — 5 мин., чем в поздней — 65 мин., причем разница здесь получается даже больше, чем для заболони (в 13 раз против 4 раз для заболони). Примерно такая же разница нами получена для ядра и при повышении температуры воды до 85° С.

3. Значительно быстрее, по сравнению с натуральной древесиной, максимум давления набухания достигается в древесине, предварительно подвергнутой попеременному замораживанию и оттаиванию. Это ускорение набухания обязано, несомненно, повышению активности взаимодействия природной целлюлозы с водой, аналогичное вызываемому заморажива-

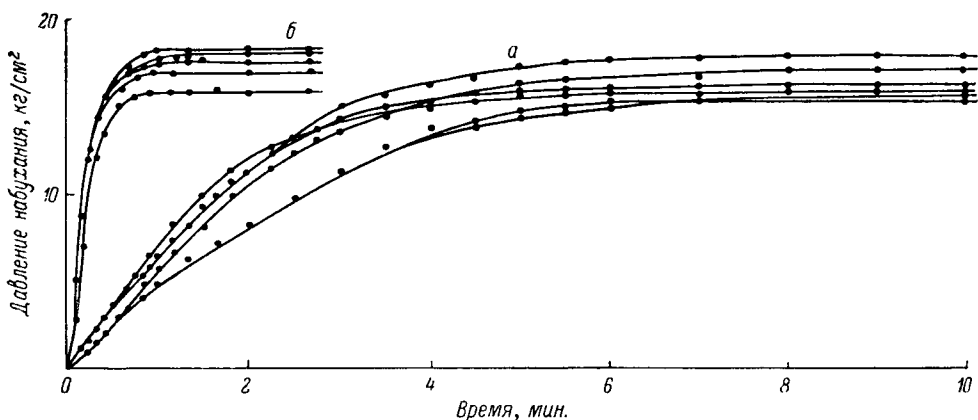


Рис. 5. Кинетика давления набухания поперек волокон древесины заболони сосны: натуральной (а) и после 5-кратного замораживания и оттаивания (б).

нием повышенню реакционной способности целлюлозы (Никитин, Кленкова, 1949).

Нами были проведены опыты с набуханием древесины заболони сосны и березы в воде при комнатной температуре, после того как было применено 5-кратное замораживание (при —5—10°С) и оттаивание. Полученная разница в основном касается времени до максимума давления набухания, которое сократилось после замораживания для заболони сосны в 6 раз (рис. 5), а для березы примерно в 3 раза. При этом величина p_n имела тенденцию к незначительному повышению.

Такие же опыты с древесиной ядра сосны и древесиной ели показали незначительное (до 1.5 раз) сокращение времени до максимума τ_p при некоторой тенденции к незначительному понижению p_n . Затем были проведены опыты на древесине ядра сосны с 3-кратным замораживанием (в течение 2 часов) при —35° и —70°С и оттаиванием. В первом случае τ_p дало примерно такое же уменьшение, т. е. около 1.5 раза при небольшом уменьшении p_n ; время до максимума деформации разбухания τ_ϵ не изменилось, а сама деформация ϵ_p незначительно увеличилась. Во втором случае было получено значительное снижение τ_p — до 5 раз при неизменном p_n или незначительном его уменьшении, а τ_ϵ незначительно уменьшилось при неизменном ϵ_p или незначительном его увеличении.

4. Начальное нажатие, превышающее σ_{nm} древесины в насыщенном состоянии, вызывает, как было показано (Иванов, 1956; Иванов и

Баженов, 1959), снижение измеряемой величины давления набухания. Предварительное обжатие древесины в воздушно-сухом состоянии приводит, после свободного разбухания и повторного высушивания (так называемая «распатанная» древесина), также к снижению p_n (Иванов, 1953 а). Однако, если p_n измерить тотчас после обжатия древесины в абсолютно сухом состоянии за $\sigma_{нт}$ (не подвергая ее предварительному свободному разбуханию и повторному высушиванию), то p_n повышается (рис. 6, б). Получаемое в последнем случае увеличение p_n вызвано, очевидно, той же причиной, что и повышенное давление разбухания прессованной древесины, а именно — приложением сил упругости распрямляющихся клеточных стенок, а, как показали микромеханические исследования, при сжатии поперек волокон за $\sigma_{нт}$ клеточные стенки искривляются (Иванов, 1953 б). Меняется и очертание кривой изменения p_n во времени, вследствие значительного увеличения для обжатого образца в начале скорости набухания (рис. 6, б).

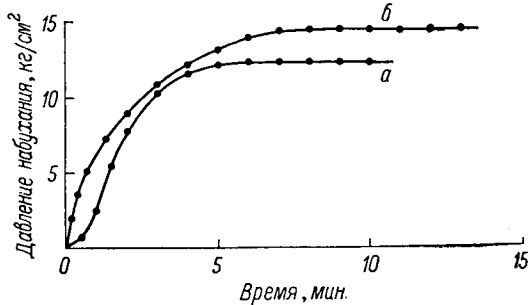


Рис. 6. Кинетика давления набухания поперек волокон древесины заболони сосны: натуральной (а) и предварительно обжатой за $\sigma_{нт}$ в абсолютно-сухом состоянии (б).

Таким образом, используя приведенные данные, можно по желанию снижать или повышать p_n древесины, применяя различное начальное нажатие, величина которого должна быть: 1) для понижения p_n — больше $\sigma_{нт}$ мокрой древесины, 2) для повышения p_n — больше $\sigma_{нт}$ абсолютно сухой древесины.

5. При проведении опытов с набуханием нами было обращено внимание на более продолжительное время, протекающее до момента достижения равновесия в случае определения деформации разбухания по сравнению с определением давления набухания. То же самое в качественном отношении отмечено Я. В. Рачковским (1957). Мы провели количественное сравнение для древесины ряда пород времени τ_e , необходимого для достижения максимума в случае свободного набухания, при измерении деформации разбухания, и времени τ_p до максимума давления набухания.⁴ Давление набухания p_n и деформация разбу-

⁴ На кинетику давления набухания и деформации разбухания влияет, конечно, присутствие воздуха внутри древесины, от удаления которого существенно зависит скорость поглощения воды древесиной (Иванов, 1958). Однако для сравнения, которое здесь преследуется, использование кинетики и таких ее показателей, как время до максимума, вполне обосновано. Предварительное вакуумирование древесины должно, конечно, ускорить процесс ее набухания. Определение давления набухания с применением вакуума производилось Я. В. Рачковским (1957). Он проделал большую работу и изучил ряд вопросов, касающихся давления набухания. С методической стороны его работы необходимо высказать некоторые замечания. Нельзя признать рациональным увеличение размера образцов, что удлинило опыты. Желая компенсировать это, Рачковский применил вакуум, для чего ввел в нашу первоначальную установку 1953 г. вакуумный стакачик. Однако вместе с этим он ввел и дополнительное сопротивление неопределенной величины, непосредственно оказывающее влияние на измеряемую величину давления набухания. К сожалению, Рачковский не исследовал этого влияния.

Рачковский отмечает, что уменьшение прогиба упругой консоли вызывает увеличение давления набухания. Некоторые данные по этому вопросу были нами получены (Иванов, 1956; Иванов, Баженов, 1959) и показали размеры этого влияния. Этот вопрос в дальнейшем заслуживает более подробного исследования.

хания ε_p поперек волокон определялись в воде (после высушивания в шкафу при 95°C) на одинаковых образцах в равных условиях. Деформация измерялась индикатором с ценой деления 0.01 мм, штифт которого упирался непосредственно в прокладку, положенную поверх парных образцов древесины, установленных в открытый стаканчик.

Полученные результаты (табл. 1) показывают, что отношение времени τ_e до максимума деформации разбухания ко времени τ_p до максимума давления набухания больше единицы, находясь для указанных пород в пределах — от 1.62 до 6.6.

Таким образом, равновесие внутренних сил набухания, характеризующее ограниченное разбухание древесины в свободном состоянии

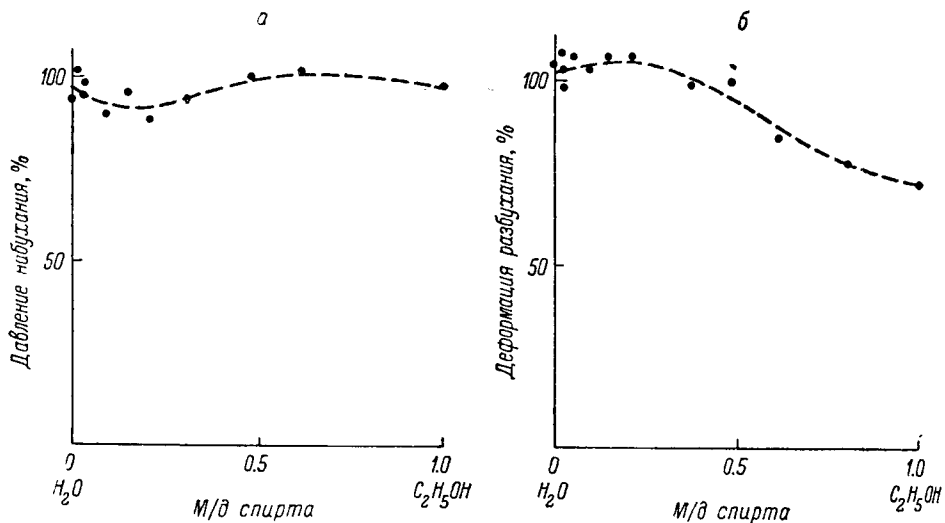


Рис. 7. Изменение давления набухания (а) и деформации разбухания (б) древесины сосны поперек волокон в бинарной смеси воды с этиловым спиртом, в зависимости от молярной доли (м/д) спирта (в % к соответствующей величине, полученной при набухании в воде).

достигается значительно медленнее, чем равновесие между внутренними силами набухания и внешней реакцией упругого элемента при измерении давления набухания.

Что касается значений p_n и ε_p , то при рассмотрении табл. 1 обращает на себя внимание у древесины павловнии малое давление набухания в радиальном направлении — менее 5 кг/см^2 и незначительное разбухание — менее 2% по радиальному направлению и около 4% по тангенциальному, а с другой стороны, — высокое давление набухания, до 44 кг/см^2 у древесины железного дерева в тангенциальном направлении.

6. В дополнение к полученным нами ранее некоторым данным о величине давления набухания в смеси спирта с водой и растворе электролита (Иванов, 1956) нами определялись давление набухания и деформация разбухания в органических жидкостях (в основном — в спиртах) и бинарных смесях. В смесях воды с этиловым спиртом (рис. 7) разница между изменением давления набухания и деформации разбухания заключается в заметном снижении последней с увеличением концентрации спирта больше

м/д 0.40—0.50,⁵ а также в том, что до м/д 0.30—0.40 деформация разбухания имеет некоторую тенденцию к увеличению по сравнению с ее величиной в воде, а давление набухания — наоборот, к уменьшению. Мы обратили внимание на то, что, начиная примерно с той же м/д 0.40—0.50, время до максимума измеряемой величины начинает резко возрастать (рис. 8). Интересно, что с той же м/д спирта 0.50 наблюдаются и уменьшенные величины как деформации разбухания, так и давления набухания, начиная с первых минут набухания образцов (рис. 9).

Падение капиллярного поглощения вследствие снижения поверхностного натяжения происходит с увеличением концентрации спирта

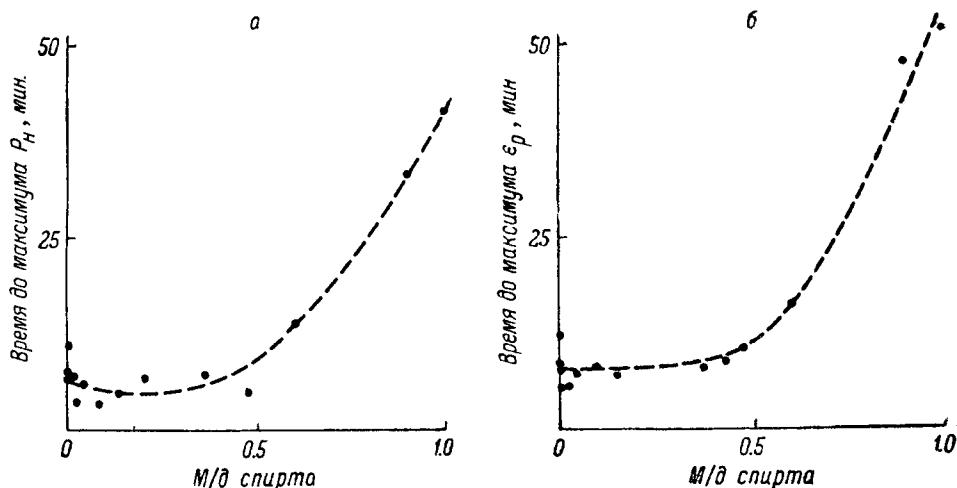


Рис. 8. Изменение времени до максимума давления набухания (а) и деформации разбухания (б) древесины заболони сосны поперек волокон в бинарной смеси воды с этиловым спиртом (к рис. 7).

весьма резко, начиная с самых малых м/д (Иванов, 1958). Поэтому отмеченное с м/д 0.50 замедление процесса набухания не может быть объяснено только уменьшением капиллярного поглощения. Здесь, по-видимому, имеет значение величина молекул жидкости, которая, начиная с некоторой концентрации (в данном случае более м/д 0.50), должна оказывать влияние, особенно на развитие второй стадии набухания. При таком увеличении концентрации спирта полная величина деформации разбухания, по-видимому, не может реализоваться вследствие того, что молекулы этилового спирта имеют значительно большую величину, чем молекулы воды. Известным подтверждением такого предположения являются данные Эриксона (Erickson, Rees, 1940) о том, что древесина разбухает поперек волокон относительно меньше в спиртах с большим молекулярным весом. Увеличение концентрации спирта более м/д 0.50 не оказывает влияния на величину давления набухания, определяемую первой стадией набухания, вызывая лишь замедление процесса набухания. Последнее следует, видимо, отнести за счет уменьшения скорости диффузии с увеличением размера молекул (Журков, Рыскин, 1954). Подтверждением такого предположения может служить проведенный нами опыт с давлением набу-

⁵ p_n в этиловом спирте по сравнению с водой получено нами около 70%, в ацетоне — 65%. Таким образом, полученная Я. В. Рачковским наибольшая величина p_n в ацетоне нашими опытами не подтверждается.

Время до максимума давления набухания τ_p и деформации разбухания τ

Порода древесины	Зона поперечного сечения ствола	Объемный вес, г/см ³	
Кедр [<i>Pinus sibirica</i> (Rupr.) Mayr]	Заболонь.	0.38	
Пихта (<i>Abies sibirica</i> Ldb.)	—	0.47—0.48	
Сосна (<i>Pinus silvestris</i> L.)	Заболонь.	0.38	
		»	0.39—0.41
		»	0.41—0.42
		»	0.43
		»	0.48—0.49
	»	»	0.51—0.57
Тис (<i>Taxus baccata</i> L.)	Ядро.	0.59—0.65	
		0.59—0.65	
Береза (<i>Betula pubescens</i> Ehrh.)	»	0.74—0.77	
		0.74—0.77	
Бук (<i>Fagus orientalis</i> Lipsky)	—	0.52—0.55	
		0.55—0.58	
		0.55—0.58	
Граб (<i>Carpinus betulus</i> L.)	—	0.73—0.78	
		0.73—0.78	
Дуб (<i>Quercus robur</i> L.)	—	0.83—0.85	
		0.80—0.84	
из нагорной дубравы	Ядро.	0.63—0.72	
из солонцово-вой дубравы	»	0.72—0.75	
Железное дерево (<i>Parrotia persica</i> C. A. Mey.)	»	0.71—0.72	
		»	»
Ильм (<i>Ulmus japonica</i> Sarg.)	Заболонь.	0.47	
		»	0.45—0.51
	Ядро.	0.49—0.51	
Клен (<i>Acer platanoides</i> L.)	»	0.51—0.54	
		0.58	
Липа (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	—	0.34—0.36	
		»	»
Ольха черная (<i>Alnus glutinosa</i> Gaertn.)	—	0.49	
		»	»
Орех грецкий (<i>Juglans regia</i> L.)	—	0.55—0.59	
		0.56—0.61	
Осина гигантская (<i>Populus tremula</i> L. var. <i>gigantea</i>)	—	0.44—0.47	
Павловния (<i>Paulownia tomentosa</i> L.)	—	0.24—0.26	
		»	»
Самшит (<i>Buxus sempervirens</i> L.)	—	0.87	

Примечание. Т — тангенциальное направление, Р — радиальное.

Таблица 1

давление набухания p_n и деформация разбухания ϵ_p поперек волокон

Направление	t °C	Давление набухания		Деформация разбухания		$\frac{\tau_{\epsilon}}{\tau_p}$
		τ_p , мин.	p_n , кг/см ²	τ_{ϵ} , мин.	ϵ_p , %	
T	+19	18—24	9.0	75—150	6.5	5.3
»	19	110—120	16.0—17.0	240—270	6.6—7.4	2.2
»	25	3—4.5	8.8—10.0	8—10	6.5	2.4
»	24.5	2.7—3.0	9.0—10.9	4—6	6.8	1.76
»	25.4	3.5—4.5	7.6—7.7	7—9	7.0—7.2	2.0
»	21.4	2.3—3	10.4—13.0	15—20	7.8—8.0	6.6
»	17.4	6	14.4	24—33	4.8—7.2	4.75
»	18—20	21	19.8	—	—	—
»	83—84	4.7	9.4	—	—	—
»	85	6	14.4	20	11.3	3.34
P	85	5.5	7.6	18	5.9	3.27
T	19.0	240—300	37.6—49.8	510—1350	4.5—6.8	1.9—5.5
P	20	240—330	27.2—28.2	390—510	3.9—4.7	1.57
T	20.1	50—80	15.3—18.1	190—390	9.7—10.2	5.13
»	20.3	10—15	19.2—22.8	70—85	8.8—11.2	6.5
»	0	—	—	27	13.3	—
»	19—20	34	38.7	128	12.6	3.7
»	85—86.5	2.1	18.2	9	13.0	4.3
»	19.3	110	35.0	190	12.2	1.72
P	20—22	110—120	44.7—50.0	210	7.5	1.82
T	19.8	240—270	30.3—32.3	390—450	6.7—7.7	1.62
»	20.5	165—180	33.0—34.7	420—510	8.6—9.7	2.7
»	19.7	60—90	43.8—45.6	360—510	10.3—12.4	5.8
P	19.7	100—130	26.8—29.1	300—390	7.3—9.8	3.0
T	19	45	10.8	—	—	—
P	19	60	12.6—13.8	—	—	—
T	18.8—19.2	110	11.7	375	9.4	3.41
P	19	55	14.6	320	7.6	5.82
T	19	180	26.2	330	10	1.83
T	19.5	18	7.5	57	12.3	3.17
P	19.5	14	8.6	48	8.4	3.33
T	20.6	55	17.6—19.6	300—330	10.2	5.73
P	21.3	77	14.2	210—240	3.5—4.2	2.92
T	19.2	80—100	23.1—28.9	300—360	8.9—9.8	3.67
P	19.2	90—160	26.5—30.8	360—390	5.0—5.7	3.0
T	20.2—22	90	9.6	390—450	8.0	4.67
»	18	120—240	8.2—8.7	330—360	3.8—4.3	1.91
P	19	120—180	4.35—4.70	300	1.8	2.0
T	19.3	270	62.1	—	—	—

хания древесины заболони сосны в глицерине при $+20^{\circ}\text{C}$ (опыт проводился в плотно закрытом эксикаторе с прокаленным хлористым кальцием на дне, отсчеты снимались через стекло) — величина давления набухания получена не меньше, чем в воде, однако время до максимума составило

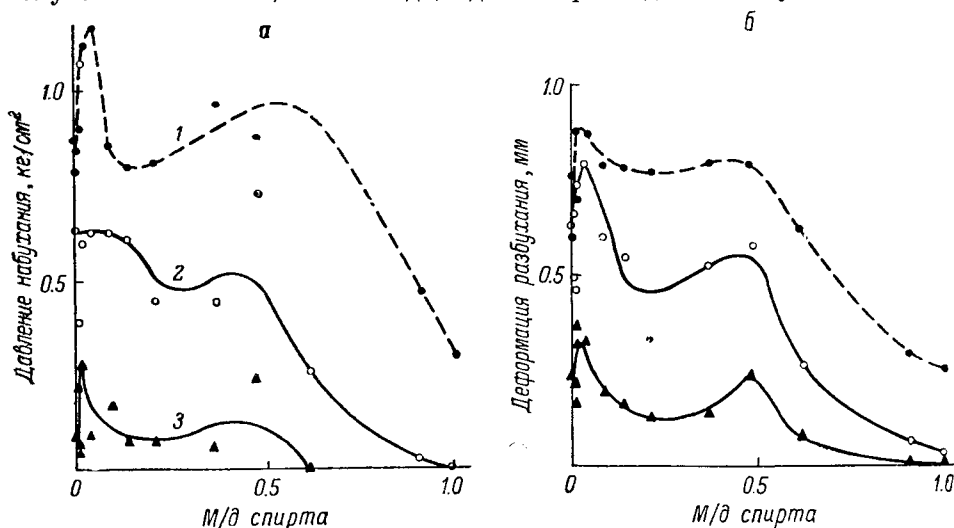


Рис. 9. Изменение давления набухания (а) и деформации разбухания (б) древесины заболони сосны поперек волокон в бинарной смеси воды с этиловым спиртом (к рис. 7 и 8).
1 — через 20 сек., 2 — через 2 мин. и 3 — через 10 мин. с момента наполнения смесью стаканчика с образцами.

около 24 000 мин., что объясняется чрезвычайно большой величиной молекул глицерина. Это время при 150°C сокращается для деформации разбухания до 100 мин. (рис. 10).

7. Кроме описанных опытов с давлением набухания и деформацией разбухания поперек волокон, были определены эти показатели набухания

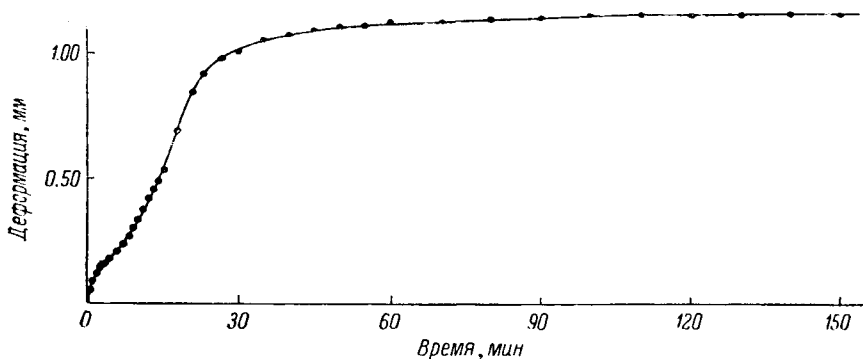


Рис. 10. Кинетика деформации разбухания поперек волокон древесины заболони сосны в глицерине при 150°C .

вдоль волокон для сжатой креновой древесины ели (из периферийной зоны нижней части ветви). Набухание производилось в воде при 84°C . Получены относительно высокие значения как давления набухания — 36.5 кг/см^2 , так и деформации разбухания — 4%, вдоль волокон.

Определение давления набухания производилось на 3 образцах, размерами $2 \times 3\text{ мм}$, высотой 7.2 мм, устанавливавшихся между прокладками

прибора. Так как при этом торцы были закрыты прокладками, то вода могла проникать в древесину образцов только поперек волокон, и время до максимума давления набухания получилось относительно больше (рис. 11, а) в сравнении со временем до максимума в опыте с определением

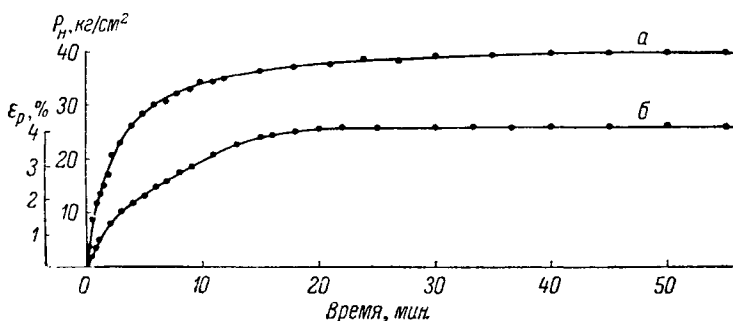


Рис. 11. Кинетика давления набухания (а) и деформации разбухания (б) вдоль волокон крестовой древесины ели в воде при 84° С.

деформации разбухания (рис. 11, б), где нижний торец образца опирался на прокладку с отверстиями диаметром 0.5 мм, а верхний был открытым и вода могла, таким образом, проникать через оба торца. Деформация разбухания вдоль волокон в данном случае (рис. 11, б) не меняет знака.

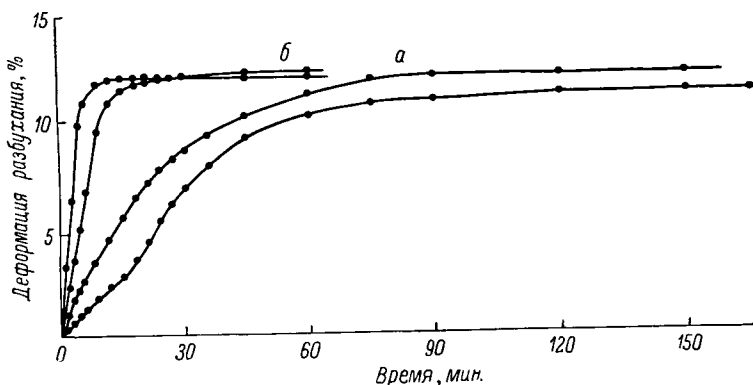


Рис. 12. Кинетика деформации разбухания в воде поперек волокон древесины бука: натуральной (а) и древесины 2, переходящей при набухании в высокоэластическое состояние (б), при 21.0° С.

8. Опыты с набуханием древесины бука, показавшей высокоэластические деформации⁶ и затем высушенной (древесина 2), дали заметную разницу в кинетике: по сравнению с натуральной древесиной (древесина 1) древесина 2 набухает быстрее. Это видно по времени до максимума как для деформации разбухания (рис. 12), так и для давления набухания (рис. 13). Для древесины 2 время до максимума в первом случае более чем в 3 раза, а во втором почти в 3 раза меньше, чем для древесины 1.

По абсолютной величине у древесины 2 давление набухания ниже, чем у древесины 1 (по данным опытов с набуханием древесины бука в воде при комнатной температуре):

⁶ См. ссылку 3.

	Число образцов	M кг/см ²	%	$\pm\sigma$ кг/см ²	$\pm m$ кг/см ²	$\pm\gamma$ %	$\pm\rho$ %
Древесина 1	12	38.7	100	3.51	1.01	9.08	2.60
Древесина 2	12	33.5	86.6	2.66	0.77	7.92	2.30

Проверка достоверности разницы дала положительные результаты:

$$\frac{38.7 - 33.5}{\sqrt{1.01^2 + 0.77^2}} = 4.1 > 3.$$

Такое же соотношение величины давления набухания для древесины 2 и 1 наблюдается и при набухании в горячей воде, при 85—90°, хотя разница во времени до максимума сглаживается.

По величине деформации разбухания древесина в высокоэластическом состоянии отличается от натуральной незначительно. Полученная разница в сделанных нами опытах недостоверна.

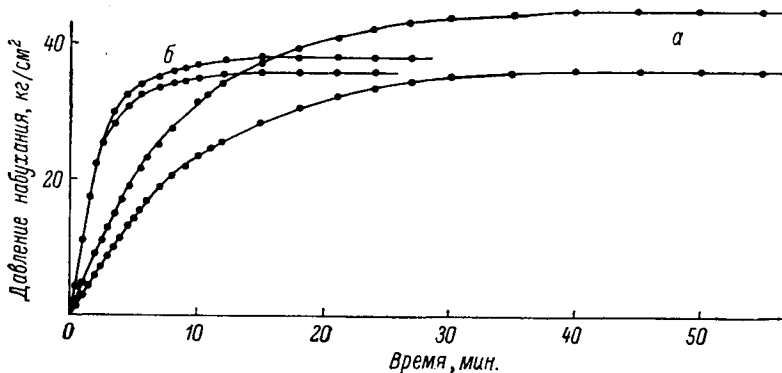


Рис. 13. Кинетика давления набухания в воде поперек волокон древесины бука: натуральной (а) и древесины 2, переходящей при набухании в высокоэластическое состояние (б), при 20.0° С.

Снижению давления набухания у древесины 2, при постоянстве поперечной деформации, может быть дано следующее объяснение.

Как отмечалось (см. выше, пункт 1), решающее значение для развития давления набухания, по-видимому, имеет первая стадия набухания. В таком случае в условиях дезориентированных звеньев цепей целлюлозы, имеющих у сухой древесины 2,⁷ адсорбция, очевидно, должна быть менее интенсивна. Поэтому максимум давления набухания у древесины 2 должен быть ниже, чем у натуральной древесины.

Что касается деформации разбухания, то вследствие влияния сетчатых связей целлюлозы (не претерпевающих каких-либо изменений при переходе в высокоэластическое состояние) и первичной оболочки величина поперечной деформации разбухания не должна заметно отличаться у древесины 2 по сравнению с натуральной древесиной.

В отношении кинетики интересно отметить повышение у древесины 2 скорости набухания вначале. Это может быть вызвано наличием дезориентированных звеньев цепей целлюлозы. Ускорение же реализации I стадии набухания связано с постепенным переходом древесины 2 по мере пластификации в высокоэластическое состояние, характеризующееся значительно большей подвижностью звеньев цепей целлюлозы по сравне-

⁷ См. выше в этом томе нашу статью «К вопросу застеклования природной целлюлозы в древесине».

нию с древесиной 1, которая находится до максимума набухания в состоянии застеклования.

9. Для проведения более тонких исследований давления набухания древесины нами сконструирован и изготовлен новый вариант прибора, основанный на том же принципе реакции упругого элемента, но с опорами рычага на призмах (рис. 14). Этот прибор позволяет производить измерение давления набухания с повышенной точностью при малых абсолютных величинах прогиба рычага. В отличие от прибора с крайней опорой рычага на шарикоподшипнике в данном приборе рычаг сделан съемным и поэтому может быть легко заменен другим, в зависимости от целей опыта. К прибору, изображенному на рис. 14, изготовлен комплект стальных рычагов разного поперечного сечения, что дает возможность варьировать абсолютную величину прогиба рычага.

Устанавливать образцы в данный прибор несколько сложнее, и делают это в следующей последовательности. Штифт индикатора поднимают над верхней гранью рычага. К левому концу рычага подвешивается гиря в 200 г, и рычаг занимает определенное положение, опираясь на две призмы (правую верхнюю неподвижную и левую нижнюю подвижную по вертикали). Перемещая рычаг вдоль самого себя, точно устанавливают его на левую призму по левой крайней риске, нанесенной на передней грани рычага. После установки стаканчика с образцами и призмой на станцию прибора, рычаг легким нажатием пальца на его правый конец приводится в соприкосновение с призмой стаканчика, штифт индикатора опускается и замечается отсчет. Затем, вращая левой рукой винт подвижной левой призмы, мы нажимаем последнюю и таким образом нажимаем рычагом на призму стаканчика, обычно до отклонения стрелки индикатора на 5 делений (т. е. на 0.005 мм).

10. Проведенные исследования позволяют заключить следующее. Давление набухания древесины падает с повышением температуры: в опытах с древесиной бука и заболони сосны при повышении температуры от 20 до 80° С p_n упало вдвое. Деформация разбухания древесины поперек волокон при указанном изменении температуры почти не изменяется. С целью объяснения полученных экспериментальных результатов высказаны некоторые соображения с точки зрения молекулярного строения целлюлозы.

Кинетика деформации разбухания ϵ_p и давления набухания p_n древесины заболони сосны меняется с повышением температуры: при 85° С начальная скорость повышается. Ранняя древесина ядра сосны набухает в 10 раз быстрее, чем поздняя при температуре воды 20—85° С. Наблюдается заметное увеличение скорости давления набухания древесины заболони сосны после попеременного замораживания и оттаивания. Давление набухания p_n древесины заболони сосны, предварительно обжатой в абсолютно сухом состоянии за σ_{nm} , превышает p_n натуральной древе-

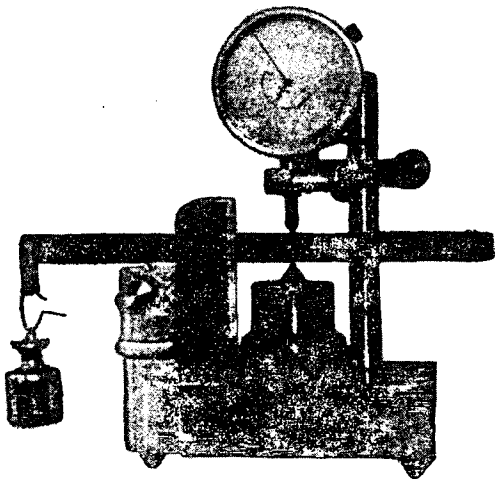


Рис. 14. Вид прибора для определения давления набухания древесины, с опорами на призмах.

сины и имеет иную кинетику с максимальной скоростью в начальный момент. Время, необходимое для достижения максимальной величины деформации разбухания древесины ряда хвойных и лиственных пород больше в 1.6—6.6 раза, чем время до максимума давления набухания. Измерено давление набухания вдоль волокон креновой древесины ели. Определены величина и кинетика давления набухания и деформации разбухания в этиловом спирте и его смесях с водой, высказано предположение о влиянии величины молекул растворителя на развитие второй стадии набухания. Опытами с древесиной бука, показавшей высокоэластические деформации и затем высушенной, выяснено, что такая древесина быстрее набухает и имеет сниженное давление набухания по сравнению с натуральной древесиной, при постоянной деформации разбухания поперек волокон.

Описан новый вариант прибора для определения давления набухания, осуществленный с опорами рычага в виде призм. Прибор предназначается для тонких исследований давления набухания древесины.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- Догадкин Б. А., М. М. Резниковский. Образование и свойства сетчатых полимеров. Усп. химии, т. 24, в. 7, 1955.
- Жеребов Л. П. Химическое разложение древесины в процессе сульфитной варки. Бум. пром., № 9, 1953.
- Журков С. Н. Исследование механизма отвердевания полимеров. Тр. 1-й и 2-й конф. по высокомолекулярным соед., Изд. АН СССР, 1945.
- Журков С. Н., Г. Я. Рыскин. Исследование диффузии в полимерах. ЖФХ, т. 24, в. 5, 1954.
- Иванов Ю. М. О давлении набухания древесины. Тр. Инст. леса АН СССР, т. 9, 1953а.
- Иванов Ю. М. Изменения микроскопического строения древесины в процессе ее деформирования и разрушения. Тр. Инст. леса АН СССР, т. 9, 1953б.
- (Иванов Ю. М.) Ivanov Yu. M. Measurement of Swelling Pressure of Wood. Composite Wood, v. 3, № 5—6, 1956.
- Иванов Ю. М. Взаимодействие между древесиной и влагой. Тр. Инст. леса АН СССР, т. 37, 1958.
- Иванов Ю. М., В. А. Баженов. Исследования физических свойств древесины. Изд. АН СССР, 1959.
- Каргин В. А., Т. В. Гатовская. Сорбция гидрированных мономеров аморфными полимерами в стеклообразном состоянии. ЖФХ, т. 30, в. 9, 1956.
- Каргин В. А., Ю. М. Малинский. Влияние пластификаторов на температуры переходов полистирола и поливинилхлорида. Сб. «Химия и физико-химия высокомолекулярных соединений», Изд. АН СССР, 1952.
- Михайлов Н. В., В. А. Каргин, В. М. Бухман. Устойчивость ориентированных волокон гидратцеллюлозы. ЖФХ, т. 14, в. 2, 1940.
- Никитин Н. И. Химия древесины. Изд. АН СССР, 1951.
- Никитин Н. И., Н. И. Кленкова. Физико-химические свойства мерсеризованной и слабо алкилированной целлюлозы. Сб. «Исследования в области высокомолекулярных соединений», Изд. АН СССР, 1949.
- Одинцов П. Н. Современные воззрения на строение целлюлозы и клеточной стенки растений. Тр. Инст. лесохоз. пробл. АН Латв. ССР, т. XII, 1957а.
- Одинцов П. Н. Изменение формы волокон холоцеллюлозы при набухании в зависимости от биоструктуры. Тр. Инст. лесохоз. пробл. АН Латв. ССР, т. XII, 1957б.
- Одинцов П. Н. Набухание древесины. Тр. Инст. лесох. пробл. АН Латв. ССР, т. XII, 1957в.
- Рачковский Я. В. Давление набухания древесины сосны и других пород. Автореферат кандидатской диссертации. Л., 1957.
- Тагер А. А., В. А. Каргин. Процесс растворения и набухания эфиров целлюлозы. ЖФХ, т. 15, в. 9, 1941.
- Ericsson H. D., L. W. Rees. The Effect of Several Chemicals on the Swelling and the Crushing Strength of Wood. J. of Agric. Research, v. 60, № 9, 1940.
- Valko E. Kolloidchemische Grundlagen der Textilveredlung. Berlin, 1937 (русский перевод 1940 г.).

УДЛИНЕНИЕ И УКРОЧЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ВДОЛЬ ВОЛОКОН ПРИ НАБУХАНИИ

Ю. М. ИВАНОВ

Состояние вопроса

Деформации усушки и разбухания древесины вдоль волокон долгое время считались ничтожно малыми. Объясняется это тем, что древесина высушивалась лишь до воздушно-сухого состояния, а в этом случае деформации вдоль волокон весьма малы. В начале прошлого столетия В. В. Петров (1819) на основании тщательно поставленных опытов с набуханием древесины отметил, что образцы древесины дуба, березы, липы, сосны, ели и ольхи, высушенные в комнатных условиях, при выдерживании их в воде «. . . оставались без приметной перемены в их длине». Незначительная величина деформации древесины вдоль волокон при колебаниях влажности давно была известна часовым мастерам и особо ценилась ими, так как изготовленный из древесины стержень маятника в стенных часах с наибольшим постоянством сохранял неизменной свою длину и тем обеспечивал верный ход часов (Петров, 1819).

Этот факт нашел подтверждение в более поздних исследованиях, которые показали, что при изменении влажности от насыщенного состояния до равновесного в комнатных условиях деформации древесины вдоль волокон крайне малы, колеблясь от 0 до 0.05—0.1%. Полная же величина деформации при сушке до абсолютно сухого состояния указывается в среднем равной вдоль волокон около 0.1—0.3% по сравнению с 3—5% в радиальном и 6—10% в тангенциальном направлениях (Перелыгин, 1957).

Однако даже весьма небольшая продольная усушка при высушивании до воздушно-сухого состояния (0.05—0.1%) может заметно сказаться при длинных элементах, вызывать коробление и даже излом дощек, выпиленных так, что одна из кромок проходит у сердцевины (Koehler, 1931). Исследования продольной усушки, проведенные с целью устранения отрицательного влияния ее на качество деревянных изделий, в различных случаях, подобных упомянутому, привели к обнаружению непропорциональности ее влажности и возможной связи с углом наклона фибрилл к продольной оси волокна, так как, чем меньше был этот угол, тем больше наблюдалась продольная усушка (Koehler, 1931). Келер произвел определение продольной усушки на ряде пород: сосне нескольких видов, дугласовой пихте, секвойе, кипарисе, араукарии, дубе, ясене, ильме, бузине, балзе и некоторых других тропических породах. Он выяснил также, что величина продольной усушки сильно колеблется, иногда показывая весьма малые, а при высушивании до воздушно-сухого состояния — даже отрицательные значения, как например в поздней зоне южной сосны, дугласовой пихты и секвойи.

Вэлч (Welch, 1935) в результате анализа опытов с древесиной разных пород высказал предположение, что продольная усушка может быть

объяснена удалением воды из промежутков между спирально расположенными фибриллами; продольное же удлинение, возможно, объясняется внутренними напряжениями, возникающими при усушке.

Продольную усушку обстоятельно исследовал Кокрэл (Cockrell, 1943, 1946, 1947), производя наблюдения над образцами древесины сосны пондерозы размерами $25 \times 25 \times 100-150$ мм. Длина образцов измерялась микрометром с точностью до 0.0025 мм три раза: насыщенных водой, воздушно-сухих (влажность около 12%) и абсолютно сухих, высушенных в шкафу. Он установил (1943), что наибольшую положительную усушку имеет древесина вблизи сердцевины. На остальной части радиуса ствола полная усушка также положительна и в среднем составляет 0.3%, и лишь у незначительного числа образцов близка к нулю или имеет отрицательную величину.

Этот исследователь провел опыты (1946) по той же методике с образцами ранней и поздней древесины той же породы, шириной 25 и длиной 250—300 мм. Ранняя древесина при высушивании до воздушно-сухого веса показала наибольшую продольную усушку, а некоторые образцы поздней древесины — удлинение. Поздняя древесина оказывала большее влияние, чем ранняя, на изменение длины образцов цельной древесины. В результате этой работы не было обнаружено тесной связи между продольной усушкой и углом наклона фибрилл, а выявлена лишь общая тенденция к повышению усушки с увеличением синуса угла наклона фибрилл, что определяется и другими факторами.

Дальнейшие опыты Кокрэла (Cockrell, 1947) с поздней и ранней древесиной той же породы показали, что при высушивании до влажности 12% и в шкафу ранняя древесина дает укорочение; большинство же образцов поздней древесины при высушивании до 12% влажности дало удлинение в пределах 0.02—0.07% и 2 образца — 0.19—0.22%, а при высушивании в шкафу — укорочение до 1.16%, хотя указанные 2 образца из 25 дали общее удлинение 0.11—0.14%. Для объяснения удлинения поздней древесины при сушке Кокрэл предложил модель и разработал теорию, к которой мы вернемся позже.

Удлинение вдоль волокон при набухании было отмечено также для цельной древесины сосны (Баженов, Иванов, 1950). Кольман (Kollmann, 1951) отмечает, что незначительная величина продольной усушки, составляющей около $1/23$ тангенциальной, и явление удлинения при сушке, возможно, объясняется винтообразным строением клеточных стенок или внутренними напряжениями растяжения. Однако более подробные количественные подсчеты все же не устраняют имеющихся здесь противоречий. Возможно, что большую роль играет здесь стеснение продольных деформаций взаимно пересекающимися левым и правым направлениями в винтообразном строении клеточной стенки.

Задачи исследования

Таково состояние вопроса по известным нам литературным данным. Принимая во внимание принципиальное значение изучения продольной деформации при сушке или набухании древесины для более глубокого понимания природы ее физических свойств и связи их с тонким строением, мы считали необходимым прежде всего расширить по этому вопросу экспериментальный материал. В развитие наших исследований процесса набухания древесины, началом для которых послужило изучение давления набухания (Иванов, 1953), мы предприняли опыты с измерением деформации древесины вдоль волокон при набухании.

Такая постановка опытов, в отличие от всех прежних исследований продольной деформации древесины, которые проводились в условиях сушки и неизбежно были связаны с длительными сроками испарения влаги из древесины, позволяла значительно ускорить наблюдения, так как при погружении образца в воду процесс набухания древесины проходит весьма быстро. Кроме того, в этом случае появляется возможность определения кинетики продольных деформаций при набухании, данные о которой до сего времени отсутствовали. Изменения длины образца древесины при набухании должны получаться лишь обратными тем, которые наблюдаются при сушке, т. е. удлинение (если оно имеет место у данной древесины) сначала и последующее укорочение (большей величины, чем удлинение) при высыхании; им должны соответствовать удлинение и последующее укорочение (меньшей величины, чем удлинение) при увлажнении.

Другими словами, в рассматриваемом случае двухзначной продольной деформации основная ее величина при высыхании в виде укорочения $-\epsilon'_x$ отвечает такой же величине удлинения $+\epsilon'_y$ при увлажнении, а меньшая ее величина при высыхании в виде удлинения $+\epsilon''_x$ — такой же небольшой величине укорочения $-\epsilon''_y$ при увлажнении, то есть при высыхании абсолютная величина укорочения больше абсолютной величины удлинения:

$$|-\epsilon'_x| > |+\epsilon''_x|,$$

а при увлажнении абсолютная величина удлинения больше абсолютной величины укорочения:

$$|+\epsilon'_y| > |-\epsilon''_y|.$$

Методика

Опыты проводились с древесиной заболони сосны и бука, причем продольные деформации при набухании изучались также в древесине бука, показавшей в набухшем виде высокоэластические деформации.¹ Образцы выпиливались пилой с бархатным диском и имели размеры вдоль волокон в среднем 8 мм (иногда брались образцы меньшей длины, до 4 мм) при поперечных размерах от 4×4 до 12×12 мм, а в случае опытов с поздней зоной годичного слоя — до толщины этой зоны, т. е. около 1 мм.

Образцы высушивались до постоянного веса в шкафу при 95°C , охлаждались в эксикаторе над прокаленным хлористым кальцием и затем помещались в стаканчик с плоским дном. С целью подвода воды к нижнему торцу образца последний устанавливался на плоскую бронзовую никелированную подкладку с несколькими вертикальными отверстиями, диаметром 0.5 мм. В верхний торец образца упирался штифт индикатора (цена деления 0.001 мм) с наконечником, металлическим никелированным или из плексигласа (со сферическим или плоским концом). В случае хвойных пород штифт всегда упирался в позднюю зону годичного слоя, середине торцевой грани образца. Влияние возможного вдавливания штифта в набухшую древесину было проверено опытами и при указанном его расположении на торце образца оказалось пренебрежимо малым.

Для получения данных об изменении продольных деформаций при набухании поздней и ранней древесины заболони сосны при отсутствии давления на древесину в направлении измерения (как это имеет место при

¹ См. выше в этом томе нашу статью «К исследованию высокоэластического состояния древесины».

использовании индикатора) предварительно были проведены опыты с применением измерительного микроскопа, снабженного микрометренным винтом, перемещающим тубус, с отсчетом в 0.001 мм. Для этих опытов образец поздней или ранней древесины 1 (рис. 1) прижимался торцом к стеклянной пластинке 2 с помощью тонкой резиновой нити 3. Стекло с образцом неподвижно укреплялось под объективом микроскопа, и нить креста совмещалась с изображением острого края образца. Край образца срезался косо, для того чтобы пузырьки воздуха, выделяющиеся из древесины при заливании ее водой, не скапливались у края, делая его изображение нерезким. Передвижение микрометричного винта производилось с исключением мертвого хода. Сила прижатия образца резиновой нитью составляла ~ 40 г. Этого было вполне достаточно, чтобы обеспечить неподвижное прижатие его к стеклу 2 и вместе с тем — не препятствовать свободной его деформации вдоль волокон при набухании.

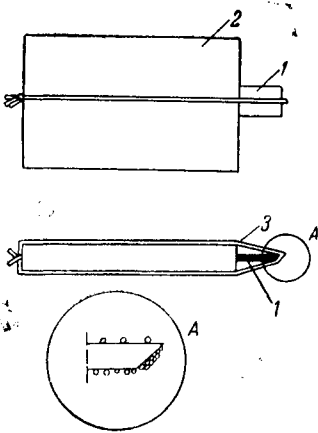


Рис. 1. Схема укрепления образца поздней или ранней древесины под измерительным микроскопом.

высыхании древесины. Кривые подобного очертания были получены и для древесины ядра сосны.

В отношении кинетики процесса обращает внимание резкий максимум удлинения на кривых, изображенных на рис. 2. Сопоставляя полученные нами кривые деформаций вдоль волокон с кривыми деформаций поперек волокон при набухании той же древесины в одинаковых условиях, можно приблизительно (принимая содержание гигроскопической влаги пропорциональным поперечной деформации) судить о том, какому условному содержанию гигроскопической влаги соответствует максимум удлинения. На рис. 3 график деформаций поперек (в тангенциальном направлении) и вдоль волокон при набухании показывает кинетику и соотношение величин этих деформаций (для комнатной температуры). Из такого сопоставления следует, что максимум удлинения достигается примерно при гигроскопической влажности около 20%. После замораживания при -35° и -70° С максимум удлинения повышается. С повышением температуры максимальное удлинение достигается раньше и, по предварительным данным, для 85° соответствует вдвое меньшей гигроскопической влажности — около 8—9%.

Эта закономерность прямого и обратного хода удлинения вдоль волокон при набухании древесины сохраняется и при повторных опытах (рис. 4).

Результаты исследования

После этого были проведены опыты с измерением деформаций индикатором. Полученные из этих опытов типичные кривые изменения деформаций вдоль волокон при набухании в воде с температурой 20° С представлены на рис. 2 (а и б) для древесины заболони сосны и бука. Эти кривые действительно показывают прямой и обратный ход деформации при набухании, противоположный тому, который наблюдался в упомянутых выше опытах ряда авторов при

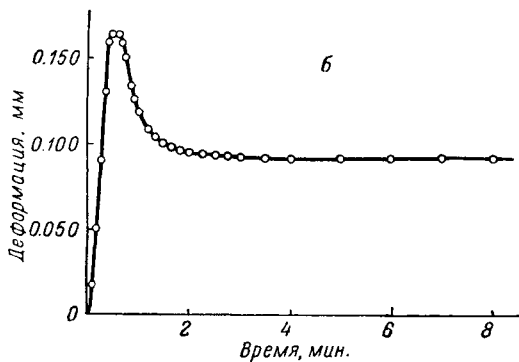
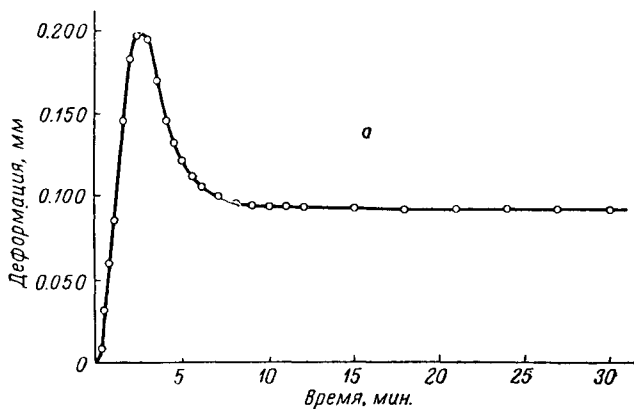


Рис. 2. Деформация вдоль волокон древесины при набухании в воде при 20° С.

а — заболонь сосны; б — бук.

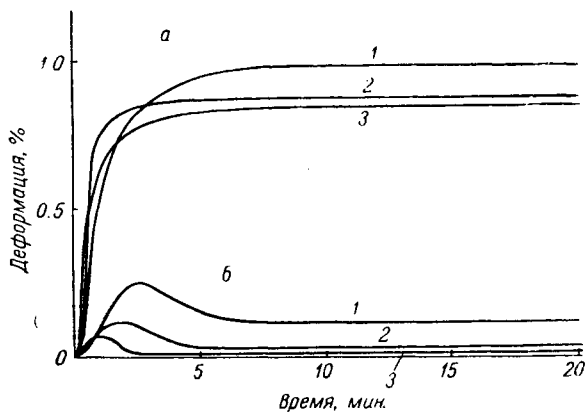


Рис. 3. Деформации поперек (а) и вдоль (б) волокон древесины заболони сосны при набухании в воде при 20° С (1, 2 и 3 — первое, второе и третье набухание после высушивания).

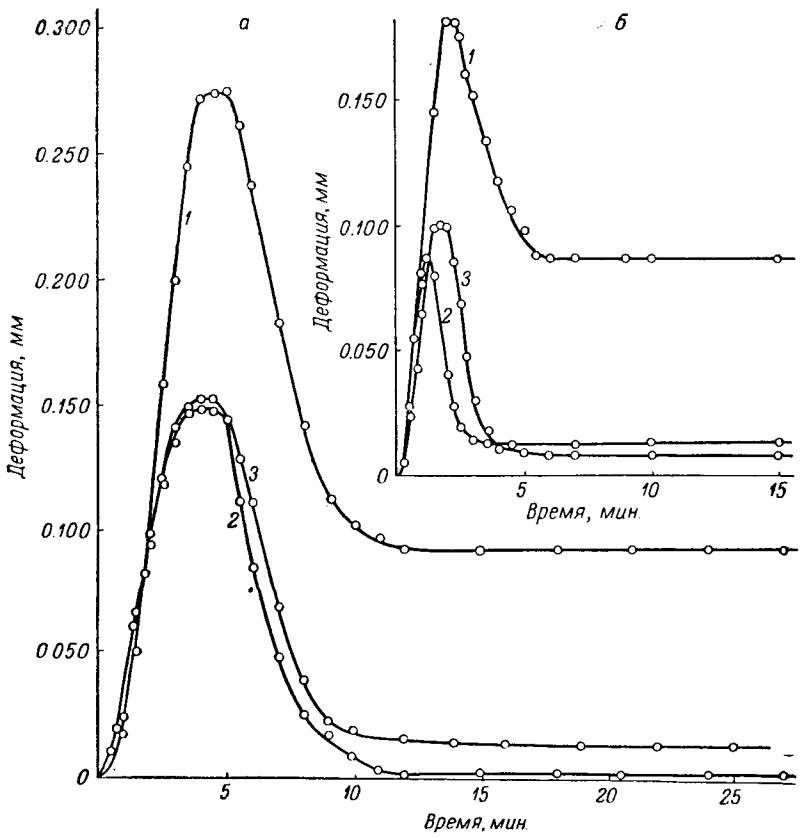


Рис. 4. Изменение деформации вдоль волокон древесины заболони сосны при набухании в воде при температуре 0 (а) и 20° (б), 1, 2 и 3 — первое, второе и третье набухание после высушивания.

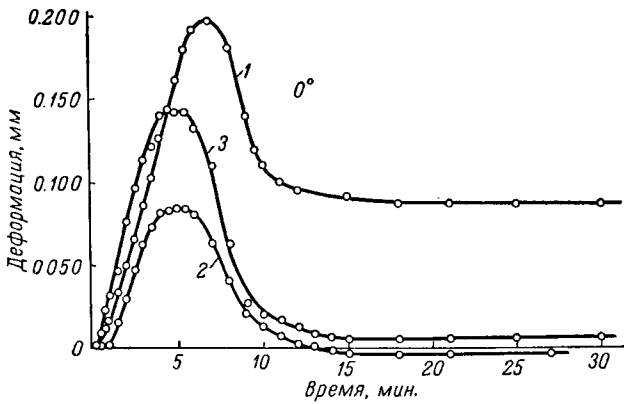


Рис. 5. Деформации вдоль волокон древесины заболони сосны при повторном набухании (1 — первое набухание, 2 — второе и 3 — третье) в воде при 0°. Кривая для 3-го набухания выше кривой для 2-го набухания.

Следует обратить внимание на общее свойство кривых, заключающееся в том, что в повторных опытах снижается больше максимум удлинения, чем абсолютная величина обратного хода. Последнее обстоятельство ведет иногда к опусканию нисходящей ветви кривой ниже оси абсцисс, как это получалось в некоторых наших опытах (рис. 5, кривая 2). Иногда наблюдалось увеличение максимума при 3-м набухании (рис. 5).

В опытах с набуханием древесины в воде разной температуры (рис. 4) кривые сохраняют в основном отмеченное характерное очертание. Однако величина ординат, а следовательно и деформаций, изменяется, а именно:

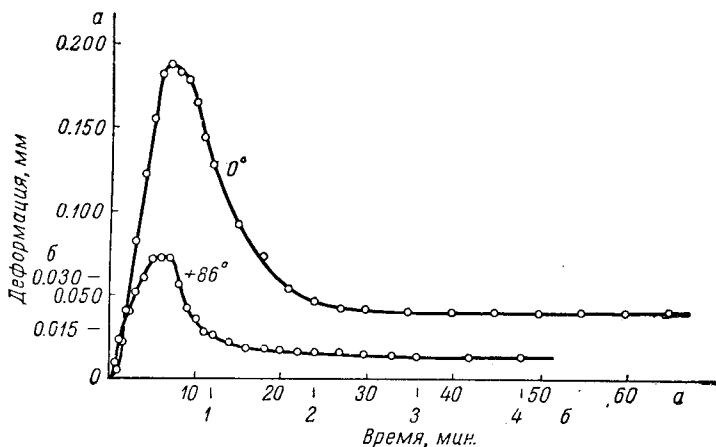


Рис. 6. Изменение деформации вдоль волокон древесины 2 бука, переходящей в высокоэластическое состояние, при набухании (в воде при температуре 0 и 86° С).

с повышением температуры деформация вдоль волокон при набухании уменьшается.

Обнаруженная температурная зависимость деформации вдоль волокон при набухании отличает ее от деформации поперек волокон, так как последняя не меняется заметно при изменении температуры.²

Древесина с переходом при набухании в высокоэластическое состояние следует в отношении указанных особенностей за натуральной древесиной, пожалуй, с некоторым относительным повышением величины обратного хода; ее деформация вдоль волокон при набухании показывает также температурную зависимость (рис. 6), в отличие от деформации поперек волокон.

Обсуждение результатов

Обсудим возможные объяснения описанных явлений. Появление максимума удлинения при набухании может быть на первый взгляд приписано кинетическому эффекту. Прежде всего постараемся ответить на вопрос, не является ли удлинение, наблюдаемое при набухании цельной древесины заболони сосны, результатом разницы в скорости набухания ранней и поздней зоны. Например, давление набухания, как было установлено (Иванов, 1956; Иванов и Баженов, 1959), достигает своего максимума в ранней зоне в 5 раз быстрее, чем в поздней. Как показали описанные здесь опыты с применением измерительного микроскопа, максимум продольного удлинения также достигается в ранней древесине быстрее. Однако ранняя

² См. выше в этом томе нашу статью «Исследование набухания древесины».

зона показывает при набухании только удлинение, без последующего укорочения. Поэтому укорочение цельной древесины не является результатом влияния ранней зоны, а, напротив, удлинение при набухании последней задерживает укорочение поздней древесины. Таким образом, деформации цельной древесины заболони сосны обусловлены деформациями в основном поздней зоны. Этот вывод был сделан раньше, как отмечалось выше, Кокрэлем, на основании результатов исследования им усушки древесины сосны пондероза.

Рассматривая деформации разного знака при набухании поздней зоны древесины сосны, возможно предположить, что кинетический эффект является следствием различия в скорости набухания различных оболочек, древесины, например первичной и вторичной. Если первая набухает медленнее, то вначале она должна стеснять поперечное разбухание второй. В результате этого может происходить удлинение вдоль волокон, чтобы в последующем смениться укорочением, когда первичная оболочка набухнет, станет податливой и не будет стеснять поперечных деформаций вторичной оболочки. Такое предположение, однако, мало правдоподобно. Так, удлинение вдоль волокон, которое (если оно имеется в исследуемой древесине) происходит в начале сушки, нельзя объяснить запаздыванием в высыхании податливой набухшей первичной оболочки. Кроме того, увлажнение, как известно из опытов с целлюлозными волокнами, мало влияет на деформативность в направлении ориентации цепей. В первичной оболочке цепи ориентированы в поперечном направлении.

Другое возможное предположение касается кинетического эффекта, выражающегося в опережении одним процессом — разбуханием вдоль волокон, другого процесса — разбухания поперек волокон. При этом предполагается, что разбухание поперек волокон сопровождается укорочением вдоль волокон.³ С возникновением внутренних напряжений, которые действуют в противоположном направлении, появляется обратный ход. Последний усиливается с появлением укорочения вследствие развития поперечного разбухания. Например, если раньше произойдет разбухание наружных слоев у торцов образца, то будет наблюдаться удлинение, которое должно смениться укорочением при поперечном разбухании образца по всей высоте. Однако разбухание торцовых частей образца в основном происходит также в поперечном направлении и должно, как было заранее обусловлено, сопровождаться укорочением образца.

Кроме сказанного, серьезное возражение против объяснения рассматриваемых явлений кинетическим эффектом состоит еще в следующем. Так как при высыхании сначала наблюдается удлинение, а затем укорочение, то если приведенные объяснения правильны, удлинение должно быть следствием опережения, а последующее укорочение — результатом действия внутренних напряжений. Однако укорочение при высыхании больше удлинения, т. е. внутренние напряжения должны вызывать большую деформацию, чем вызвавшая их причина, что явно абсурдно.

Таким образом, предположение о роли кинетического эффекта не может служить объяснением рассматриваемого явления. Продольная деформация древесины есть проявление анизотропии ее набухания. Поскольку анизотропия набухания древесины обуславливается высокоориентированной целлюлозой вторичных оболочек, то объяснение описанных здесь явлений следует искать, по-видимому, в молекулярном строении целлюлозы.

Первая наиболее обстоятельная попытка дать объяснение в указанном направлении принадлежит Кокрэлу (Cockrell, 1947). Для объяснения уд-

³ См. сноску 2.

линия поздней древесины при сушке Кокрэл предложил модель и на ее основе разработал теорию продольной усушки, которая вводит в рассмотрение четыре фактора: 1) взаимосвязь цепей целлюлозы, по предположению, прямолинейных; 2) угол наклона фибрилл; 3) длину цепей между шарнирными скреплениями их друг с другом в местах пересечений и 4) ширину микрокапиллярных промежутков между цепями целлюлозы.

Сущность этой теории заключается в наложении влияния двух перемещений путем суммирования их проекций на продольную ось волокна, а именно: удлинения ромбовидной сетки цепей и укорочения вследствие поперечного сокращения сетки при усушке. Первое, кроме того, считается изменяющимся неравномерно, а именно — меньше в конечной стадии сушки, при приближении древесины к абсолютно сухому состоянию. Для малых углов наклона фибрилл к продольной оси волокна первая составляющая будет близка к полной своей величине, и поэтому сумма будет определять предельное удлинение в первый период сушки, когда вторая составляющая мала. Во второй период преобладающее влияние приобретает вторая составляющая, и сумма будет определять продольное укорочение.

При достаточной величине угла наклона фибрилл проекция поперечной усушки на продольную ось волокна может перекрыть продольное удлинение. Основой всей концепции Кокрэла является представление о прямолинейности молекулярных цепей целлюлозы, ориентированных параллельно продольной оси фибрилл. Это представление противоречит современным научным данным о строении высокомолекулярных веществ, в частности — линейных полимеров, к которым относятся целлюлоза и ее производные. Согласно кинетической теории высокоэластической деформации полимеров (Mark, 1938), цепи всегда более или менее изогнуты, что определяется наличием потенциальных барьеров вращения отдельных звеньев, в расположении и ориентации которых наблюдается строгая корреляция. Очертание цепи рассматривается как статистически равновесная форма ее, соответствующая минимуму свободной энергии. Ориентация же цепей определяется лишь тем, что в среднем они несколько больше вытянуты в каком-либо одном направлении, в данном случае — по продольной оси фибрилл.

Переходя к четырем факторам, на которых основано объяснение продольной усушки с помощью модели Кокрэла, отметим следующее. Взаимосвязь цепей, выражающаяся наличием точек, около которых взаимно поворачиваются прямолинейные цепи в модели, целиком связана с прямолинейностью цепей, и к ней относится все отмеченное выше. То же самое следует сказать и о длине цепей между шарнирами: если отпадает представление о прямолинейных цепях, само собой отпадает и представление о шарнирах и расстояниях между ними. Влияние ширины микрокапиллярных промежутков между цепями становится ясным при рассмотрении модели. Действительно, при большой изогнутости цепей расстояние между отдельными звеньями, расположение и ориентация которых крайне многообразны, не могут иметь однозначной связи с величиной усушки. Лишь последний фактор — угол наклона фибрилл несомненно важен для объяснения продольной усушки, поскольку представляет собой характеристику, связанную с анизотропией строения древесины и ориентацией целлюлозы вторичных оболочек.

Теория Кокрэла явилась первым шагом в создании рационального объяснения продольного удлинения древесины при высыхании на основе элементов молекулярного строения целлюлозы, и в этом ее ценность. Основной недостаток ее, заставляющий искать иного объяснения описы-

ваемых явлений, заключается в том, что она допускает прямолинейность цепей целлюлозы, рассматривая их статически, с чисто геометрической точки зрения. Между тем цепи полимеров находятся в динамическом взаимодействии, с непрерывно меняющейся геометрией их расположения в пространстве.

По существу в описанных результатах опытов привлекает внимание факт продольного удлинения древесины при высыхании и соответствующего этому укорочения при набухании. Этот факт и должен быть прежде всего объяснен. Укорочение, следующее за удлинением при высыхании, и удлинение при набухании, поскольку они имеют тот же знак, что и поперечная деформация, могут быть, очевидно, объяснены как некоторая составляющая основной поперечной деформации. Одновременно следует объяснить наличие температурной зависимости у продольной деформации и отсутствие ее у поперечной деформации при набухании древесины.

В предыдущей статье⁴ была сделана попытка объяснения продольного удлинения и следующего за ним укорочения при набухании древесины. Вкратце это объяснение сводится к следующему. В первой адсорбционной стадии взаимодействие между макромолекулами целлюлозы уменьшается вследствие экранирования молекулами воды полярных групп целлюлозы (Журков, 1945) и среднее расстояние между ними увеличивается.

При основной величине расширения в направлении наименьшей ориентации некоторая составляющая его наблюдается и в продольном направлении, как следствие изогнутости макромолекул, имеющих продольную ориентацию лишь в среднем. При этом, чем больше наклон фибрилл к продольной оси волокна, тем больше должна быть эта составляющая. Таким образом, в начальной стадии набухания сухой древесины в воде должно происходить удлинение вдоль волокон. При дальнейшем увеличении концентрации пластификатора (воды) подвижность звеньев возрастает и может проявляться влияние стягивания цепей в направлении их ориентации (т. е. обратного движения, при продолжающемся расширении поперек фибрилл).

Укорочение во второй стадии набухания может быть и незаметным. Если угол наклона фибрилл к продольной оси волокна недостаточно мал, то проекция поперечного расширения структуры, продолжающего развиваться во второй стадии набухания, может оказаться больше укорочения и суммарная деформация в продольном направлении не будет менять знака. Этим, возможно, следует объяснить отсутствие продольного укорочения при набухании ранней древесины сосны, угол наклона фибрилл к продольной оси, волокна в которой больше, чем в поздней древесине.

Развитию процесса стягивания цепей в продольном направлении, по видимому, препятствует ограничение расширения их в поперечном направлении сетчатыми связями между цепями целлюлозы. Вследствие этого обратный ход продольной деформации не проявляется в значительном размере как у натуральной древесины, так и у древесины 2, переходящей при набухании в высокоэластическое состояние⁵. Хотя в последнем подвижность звеньев и участков цепей целлюлозы значительно больше, чем у натуральной древесины, однако перемещения цепей сдерживаются теми же сетчатыми связями, концентрация которых не снижается в высокоэластическом состоянии. Кроме того, при максимуме набухания может проявляться влияние тонкой первичной оболочки, нерастяжимость ко-

⁴ См. сноску 2.

⁵ См. сноску 1.

торой должна обуславливать, по-видимому, стабильность максимальной деформации поперек волокон при набухании древесины в условиях различной температуры, а также в высокоэластическом состоянии (где она заметно не отличается по величине от поперечной деформации натуральной древесины).

Применим это объяснение к случаю высушивания древесины, где описанные явления должны развиваться в обратной последовательности. С уменьшением концентрации пластификатора (воды) от максимальной будет происходить уменьшение средних расстояний между макромолекулами целлюлозы. Натяжение сетчатых связей между последними, которое обуславливало известное ограничение поперечного расширения и стягивание цепей в продольном направлении, теперь ослабляется. Следовательно, ослабляется и стягивание цепей в продольном направлении; они могут теперь располагаться свободнее, чему будет соответствовать некоторое продольное удлинение.

По мере потери пластификатора подвижность звеньев уменьшается и продольное движение цепей постепенно приостанавливается и переходит в продольное укорочение, являющееся составляющей общего сокращения структуры полимера по мере дальнейшей потери пластификатора в адсорбционной стадии. В последней межмолекулярное взаимодействие увеличивается, следствием чего является общее уменьшение средних расстояний между соседними макромолекулами целлюлозы.

Рассмотрим влияние повторного быстрого высушивания в шкафу и набухания, а также влияние температуры воды, в которой происходит набухание образцов древесины. Во время высыхания древесины влага удаляется и среднее расстояние между макромолекулами целлюлозы уменьшается, межмолекулярное взаимодействие усиливается, что в свою очередь облегчает взаимное насыщение гидроксильных групп с образованием водородных связей (Urquhart, Williams, 1924). При последующем увлажнении развитие адсорбционной стадии набухания, по-видимому ввиду уменьшенного количества свободных гидроксильных групп, будет меньшим и сопровождающее ее удлинение вдоль волокон будет также снижено. На вторую же стадию набухания, не связанную непосредственно с экранированием гидроксильных групп, влияние сушки будет значительно меньше. Поэтому максимум удлинения должен заметно снижаться, при сравнительно меньшем снижении последующего укорочения, что мы и наблюдаем при втором набухании. Отметим, что перед началом опытов (т. е. перед первым набуханием) происходящая до величины 8—10% воздушная сушка в комнатных условиях обычно растягивается на долгое время и лишь последние проценты влаги удаляются в шкафу. Вследствие этого описанные явления не могут проявиться в сколько-нибудь заметной степени при первом набухании. После же быстрой сушки в шкафу при 95° от насыщенного до абсолютно сухого состояния указанное влияние может проявиться в полной мере, что и обнаруживается в падении максимума удлинения при втором набухании. После второго набухания ничего нового не прибавляется в отношении сушки. Напротив, образовавшиеся в целлюлозе во время быстрой сушки перед вторым набуханием водородные связи могут быть частично разорваны набуханием (Роговин, Шорыгина, 1953), что может вызвать некоторое увеличение максимума удлинения вдоль волокон при третьем набухании, как это нередко и наблюдалось в наших опытах.

С повышением температуры интенсивность адсорбции снижается, поэтому при набухании межмолекулярное взаимодействие ослабляется меньше, чем если бы адсорбция происходила при более низкой темпера-

туре, что в свою очередь ведет к уменьшению расширения цепей в первой стадии.

Степень развития второй стадии набухания, связанной с проявлением подвижности звеньев цепей при увеличении концентрации пластификатора, с повышением температуры должна была бы не уменьшаться, а скорее даже проявляться более отчетливо и в более короткое время в силу более интенсивного теплового движения, если бы на развитие этой стадии не накладывали ограничения стягивание цепей и влияние первичной оболочки.

В результате все же при повышении температуры, по-видимому, должен больше уменьшаться максимум удлинения, чем последующее укорочение. Именно подобная тенденция усматривается в полученных нами диаграммах продольных деформаций при набухании древесины в воде различной температуры.

Заключение

В итоге описанных опытов определена кинетика удлинения и укорочения вдоль волокон при набухании (соответствуют удлинению и укорочению вдоль волокон при высыхании) у цельной древесины заболони и ядра сосны (как результат влияния поздней зоны годичных слоев, так как ранняя зона при набухании дает только удлинение) и у древесины бука: в процессе набухания в воде абсолютно сухой древесины сначала происходит удлинение вдоль волокон с ясно выраженным максимумом — до 1.5—2%, а затем укорочение — около 1%, при суммарной продольной деформации около 0.5—1%. Максимум удлинения, по предварительным данным, соответствует условной гигроскопической влажности древесины около 20% при 0—20° и 8—9% при 85° С. Проведенные опыты показали, что быстрая сушка в шкафу при 95° С вызывает главным образом уменьшение максимума удлинения и меньше влияет на обратный ход деформации (т. е. укорочение) вдоль волокон при набухании. Установлено, что отличительной особенностью продольной деформации при набухании древесины по сравнению с поперечной деформацией является ее температурная зависимость — снижение величины продольной деформации (как максимума удлинения, так и обратного хода, т. е. укорочения) с повышением температуры. Подобная же температурная зависимость наблюдается и у древесины 2 бука, переходящей при набухании в высокоэластическое состояние.⁶

Сделана попытка объяснения удлинения и укорочения вдоль волокон древесины при набухании на основании молекулярного строения высокоориентированной целлюлозы вторичных оболочек древесины.

Большую помощь в экспериментах оказала Л. Н. Солнцева, которой автор считает своим долгом выразить благодарность.

ЛИТЕРАТУРА

- Баженов В. А., Ю. М. Иванов. Влияние набухания на деформации предварительно обжатой древесины. ДАН СССР, т. LXXIII, № 4, 1950.
 Журков С. Н. Влияние объемной сорбции на механические свойства полимеров. ДАН СССР, т. XLIX, № 3, 1945.
 Иванов Ю. М. О давлении набухания древесины. Тр. Инст. леса АН СССР, т. 9, 1953.
 (Иванов Ю. М.) Ivanov Yu. M. Measurement of Swelling Pressure of Wood Composite Wood, v. 3, № 5—6, 1956.
 Иванов Ю. М., В. А. Баженов. Исследования физических свойств древесины. Изд. АН СССР, 1959.

⁶ См. справку 1.

- Перелыгин Л. М. Дреvesиноведение. Гослесбумиздат, 2-е изд., 1957.
- Петров В. В. Умозрительные исследования СПб. Академии наук, т. 5, СПб., 1819.
- Роговин З. А., Н. Н. Шорыгина. Химия целлюлозы и ее спутников. Госхимиздат, 1953.
- Cockrell R. A. Some Observations on Density and Shrinkage of Ponderosa Pine Wood. Trans. ASME, v. 65, № 7, 1943.
- Cockrell R. A. Influence of Fibril Angle on Longitudinal Shrinkage of Ponderosa Pine Wood. J. Forestry, v. 44, № 11, 1946.
- Cockrell R. A. Explanation of Longitudinal Shrinkage of Wood Based on Interconnected Chain-Molecule Concept of Cell-Wall Structure. Trans. ASME, v. 69, № 8, 1947.
- Koehler A. The Longitudinal Shrinkage of Wood. Trans. ASME, v. 53, № 17, 1931.
- Kollmann F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Bd. 1, 1951.
- Mark H. Natural and Synthetic Rubber. The Elasticity of Long-Chain Molecules. Nature, v. 141, 1938.
- Urquart A. R., A. M. Williams. The Moisture Relations of Cotton. J. Textile Inst., v. 15, t. 138, 1924.
- Welch M. B. The Longitudinal Variation of Timber During Seasoning. J. a. Proceed. Roy. Sci. of New South Wales, v. 66, 1933; v. 68, 1935 (цит. по Cockrell'у).
-

О ПЕРВЫХ РАБОТАХ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕЛИЧИНЫ КОРОБЛЕНИЯ

Ю. М. ИВАНОВ

В курсе лекций по механической технологии древесины профессора Петербургского технологического института Петра Алексеевича Афанасьева (1879) сказано: «Определение величины коробления нам не удалось встретить ни в одном из сочинений по дереву, хотя этот вопрос имеет значение при заготовке лесных материалов и в некоторых других случаях. Первая работа в этом направлении, сколько нам известно, принадлежит профессору нашего Института А. В. Гадолину, она была помещена в литографированном курсе технологии дерева, читанном в 1873 г., и разрешает вопрос о величине коробления». Далее дается весьма подробный анализ деформации коробления с выводом формулы стрелки кривой коробления.

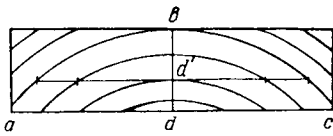


Рис. 1. Коробление доски, подвергшейся сушке.

Нас заинтересовало это указание на работу А. В. Гадолина, поиски которой во многих библиотеках Москвы и Ленинграда привели к литографированному курсу артиллерийской технологии А. В. Гадолина, единственный экземпляр которого был нам любезно предоставлен фундаментальной библиотекой Артиллерийской академии им. Ф. Э. Дзержинского. В этом курсе имеется следующий текст, относящийся к рассматриваемому нами вопросу (стр. 140—141): «... замечено, что доска, которая подвергается сушке... коробится таким образом, что оболонная сторона делается вогнутою. Это явление можно объяснить таким образом: при сушке стягивание по направлению годовых слоев значительно сильнее, чем по направлению сердцевинных лучей, поэтому дуга какого-нибудь годового круга abc (рис. 1)¹ уменьшается в длину больше, чем соответствующая ей сторона bd . Если после стягивания дуга abc приняла длину $a'b'c'$, то геометрическая стрелка ее будет bd' , между тем как толщина доски bd уменьшилась в меньшей степени, а поэтому сердцевинная сторона доски должна выходить выпуклою. Объясняют часто подобное коробление доски тем, что части дерева,

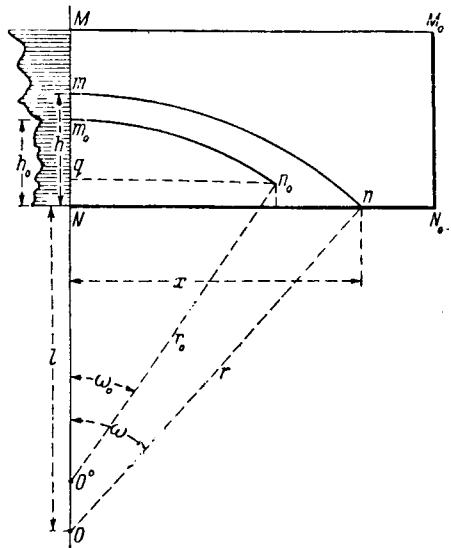


Рис. 2. Направление сердцевинного луча.

¹ Рис. 1 представляет собой схему со стр. 141 курса А. В. Гадолина.

более близкие к оболони, стягиваются при сушке сильнее, нежели древесина, более близкая к сердцевине; но в справедливости такого свойства дерева мы не имеем положительных доказательств».

Поскольку поиски привели нас к этому тексту Гадолина, следует считать его изложением той первой попытки подойти к определению величины коровления, о которой упоминает П. А. Афанасьев. Развитием этой попытки является следующий анализ, проведенный Афанасьевым в своем курсе.

Сердцевинный луч OM идет посредине доски MN (рис. 2)² нормально к пластям MM_0 и NN_0 доски, поперечное сечение которой MM_0N_0N показано на рис. 2. Дуга mn представляет один из годовичных слоев с радиусом r (центр окружности слоя O) и стрелкой $h = Nm$ до усушки и m_0n_0 с радиусом r_0 (центр окружности слоя O_0) и стрелкой $h_0 = Nm_0$ после усушки.

Обозначим NO' через l , Nn — через x и Nq , равное поднятию точки n относительно точки N при коровлении, через y .

Как показывает рис. 2,

$$y = h_0 - r_0(1 - \cos \omega_0). \quad (1)$$

Приняв коэффициент тангенциальной усушки за μ и радиальной — за ν , получим:

$$\left. \begin{aligned} h_0 - (1 - \nu)h &= (1 - \nu)r(1 - \cos \omega), \\ r_0 &= (1 - \nu)r, \\ \omega_0 &= \frac{(1 - \mu)mn}{(1 - \nu)r} = \frac{1 - \mu}{1 - \nu} \omega = (1 - \delta)\omega, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где δ почти равно $(\mu - \nu)$.

Из (2) и (1) имеем:

$$y = (1 - \nu)r[\cos(\omega - \delta\omega) - \cos \omega]. \quad (3)$$

Так как $\cos(\omega - \delta\omega) = \cos \omega \cdot \cos \delta\omega + \sin \omega \cdot \sin \delta\omega$,

$$\sin \omega = \frac{x}{r} \quad \text{и} \quad \cos \omega = \frac{l}{r},$$

то из (3)

$$y = (1 - \nu)[x \sin \delta\omega - l(1 - \cos \delta\omega)]. \quad (4)$$

Следовательно, y тем больше, чем меньше l , т. е. чем ближе доска выпилена к сердцевине.

Заменяя по малости угла $\delta\omega$ синус его дугой и косинус единицей, приближенно определяем

$$y = (1 - \nu)x\delta\omega \quad (5)$$

или, окончательно, пренебрегая величиной ν по сравнению с единицей,

$$y = \delta x \omega = \delta x \operatorname{arctg} \frac{x}{l}. \quad (6)$$

² Рис. 2 и следующие рис. 3 и 4 являются пояснительными чертежами, изображенными на фиг. 65—67 курса П. А. Афанасьева.

Анализируя уравнение (6), можем отметить, что наибольшая величина коробления для широких досок у сердцевинны (когда центр бревна лежит на пласти доски) при $\operatorname{arctg} \frac{x}{l} = \frac{\pi}{2}$ будет

$$y = \frac{\pi}{2} \delta x, \quad (7)$$

где x — половина ширины доски.

Здесь указывается, что если сердцевинный луч OM , перпендикулярный к пласти, идет вдоль доски посредине ее ширины, то продольная ось доски после усушки останется прямой. «Если же луч OM ... будет лежать не посредине ширины торцовых концов и на обоих концах будет находиться в различных расстояниях от края доски, то для обоих концов коробление или величина y будет различная и разность между величинами y даст коробление по длине доски, причем линия, соединяющая перпендикулярные лучи на обоих торцовых концах, останется прямой. Если на одном из торцов совсем не будет перпендикулярного к широким плоскостям доски луча и прямая, соответствующая направлению перпендикулярного луча, на другом торце выходит в боковой край доски, то такая доска согнется по оси своей длины».

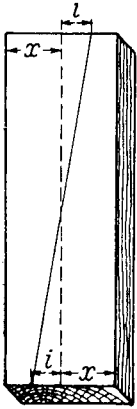


Рис. 3. Коробление при перпендикулярном луче.

Наиболее невыгодное коробление по длине и ширине доски (называемое теперь крыловатостью) будет в том случае, когда сердцевинный луч OM (перпендикулярный к пластям) идет по диагонали доски. Величина его составит

$$y = \pi \delta x. \quad (8)$$

Далее читаем:

«При заготовлении досок надо поэтому стараться, чтобы луч, перпендикулярный к широким плоскостям доски, не шел по диагонали доски, но чтобы по возможности на обоих торцах этот луч располагался посредине ширины доски.

Так как трудно во всех досках достигнуть, чтобы перпендикулярный луч на обоих торцах располагался посредине доски, то при желании иметь доски, в которых коробление не превосходило бы известного предела, надо назначить предел или допуск, далее которого перпендикулярный луч не должен отклониться от середины доски. Если обозначим через i ту величину, на которую перпендикулярный луч может отклониться от середины доски (рис. 3 и 4), то коробление на концах, принимая в основание формулу (8), будет:

$$\frac{\pi}{2} \delta (x + i) \quad \text{и} \quad \frac{\pi}{2} \delta x (x - i),$$

а коробление по длине доски, равное разности короблений на концах, будет $\pi \delta i$.

«Для примера определим величину коробления в дубовой и сосновой досках десяти дюймов ширины при самом невыгодном случае, когда оси бревен, из которых выпилены доски, лежат на широкой их плоскости.

«Если перпендикулярный луч расположен на середине обоих тор-

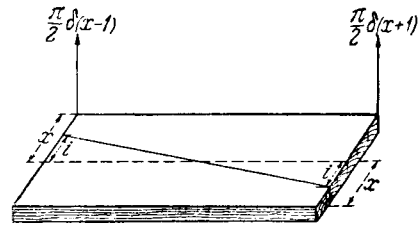


Рис. 4. Коробление на концах доски.

цовых концов, то по формуле $\frac{\pi}{2} \delta x$ будем иметь коробление для дубовой доски:

$$y = \frac{3.14}{2} (\mu - \nu) 5'' = \frac{3.14}{2} 0.04 \cdot 5 = 0.314'',$$

для сосновой:

$$y = \frac{3.14}{2} 0.03 \cdot 5 = 0.235''.$$

«Если перпендикулярный луч отстоит от середины доски на один дюйм, то наибольшее коробление будет

$$\frac{\pi}{2} \delta (x + i) = \frac{\pi}{2} (\mu - \nu) 6'',$$

т. е. в этом случае оно будет больше, чем в предыдущем примере, в отношении 6 к 5, или в 1.2 раза».

«У досок, выпиленных на дальнем расстоянии от центра бревна, коробление будет меньше (рис. 3)».

«В косослойных досках коробление значительнее. Здесь надо также относить рассуждение к перпендикулярному лучу: на обоих торцовых концах могут быть такие лучи посредине ширины доски, но луч одного конца не соответствует лучу другого конца, и для определения величины i в таком случае надо следить за направлением волокон, а заключение о короблении делать применительно к искривленному положению перпендикулярного луча, видимого на одном из торцов. Во многих случаях косое направление волокон может быть очень мало и потому незаметно для глаза, но оно имеет во всяком случае влияние на коробление и увеличивает его тем более, чем длиннее доска».

«Определенные выше величины короблений должны быть приняты во внимание, когда желают заготовить доски или другие предметы с расчетом, чтобы после высушки, когда они покоробятся, их можно было бы затем привести к правильному виду определенных размеров».

«Очевидно, что напуски, или излишки, в размерах при заготовлении, например, досок должны быть примерно равны удвоенным величинам y , определенным по приведенным выше формулам, тогда только, снявши с обеих широких сторон выступающие части, можно получить правильную доску» (рис. 4).

Как видим, П. А. Афанасьев делает из результатов теоретического анализа ряд важных практических выводов.

Приведенный здесь из курса Афанасьева подробный математический анализ коробления с выводом впервые формулы стрелы кривой коробления представляет собой оригинальное исследование. Из сравнения приведенных цитат из А. В. Гадолина и П. А. Афанасьева мы должны заключить, что решение вопроса о величине коробления было дано Афанасьевым, известным в истории отечественного лесоведения своими выдающимися трудами по вопросам резания древесины.

Обе эти работы русских ученых являются первым научным исследованием величины коробления, представляющим интерес и теперь, в связи с тем вниманием, которое привлечено за последнее время к деформациям древесины и деревянных деталей, связанным с изменениями влажности, в том числе — и к короблению.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- Афанасьев П. А. Лекции. Курс механической технологии дерева. СПб., 1879 (литографированное издание).
 Гадолин А. В. Курс артиллерийской технологии. Общая часть, ч. 1, б. г., стр. 140—142 (литографированный курс).

СРАВНИТЕЛЬНО-АНАТОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗРЕЛОЙ ДРЕВЕСИНЫ КОРНЕЙ И СТВОЛОВ НЕКОТОРЫХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

Л. А. ЛЕБЕДЕНКО

Изучению корневых систем древесных растений посвящено немало исследований, но среди них лишь немногие рассматривают вопрос анатомического строения древесины корней. При этом как в ранних исследованиях (Shacht, 1859; Mohl, 1862; Черняев, 1864), так и в более поздних (Noelle, 1910; Liese, 1924; Pohl, 1926, 1927; Пысларь, 1936; Веакбане а. Thompson, 1939, 1941) отмечаемые различия в строении древесины корней и ствола носят преимущественно количественный характер, касающийся соотношения тканей, размера элементов и ширины годичных колец. Между тем несравненно больший интерес представляют структурные различия в древесине корня и ствола, так как эти факты и их интерпретации могут иметь большое теоретическое значение. Однако вопросу структурных особенностей древесины корней посвящены лишь единичные работы (Riedle, 1937; Fegel, 1941; Вихров и Туманян, 1953), и наши представления об анатомическом строении древесины корней древесных растений и отличиях ее от древесины ствола крайне поверхностны.

Мы изучили древесные растения порядка *Fagales*, являющиеся эдификаторами основных лесных биогеоценозов умеренной зоны. Всего исследовано 7 видов — ольха серая [*Alnus incana* (L.) Moench.], береза бородавчатая (*Betula verrucosa* Ehrh.), лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.), граб кавказский (*Carpinus caucasica* A. Grossh.), бук восточный (*Fagus orientalis* Lipsky), каштан съедобный (*Castanea sativa* Mill.) и дуб восточный (*Quercus laeocranthera* F. et M.). Растения в возрасте 25—30 лет. Образцы корня и ствола брались на расстоянии 15—20 см от корневой шейки. У березы и дуба корни исследовались по их длине. У березы, корневая система которой представлена в основном боковыми корнями, образцы были взяты на расстояниях 1—2, 50, 100, 150 и 200 см от оси дерева. У дуба с хорошо развитыми главными и боковыми корнями исследовались и те и другие. Главный корень исследовался на расстоянии 10, 30, 50, 70 и 100 см от корневой шейки, боковые корни — на расстоянии 1—2, 50, 100, 150 и 200 см от главного корня. Дополнительно изучались обнаженные корни каштана и укоренившаяся ветка дуба иберийского (*Q. iberica* Stev.). Материал в основном собран в Куткашенском лесхозе Куткашенского района АзССР.

Достигнутая на определенном этапе развития зрелая структура древесины повторяется затем уже с одинаковыми чертами из года в год много десятилетий. Условия произрастания, влияя в определенном направлении на количественную характеристику зрелой древесины — ширину годичных колец (Шатерникова, 1929; Коссович, 1935; Жилкин, 1936; Савина, 1939; Мелехов, 1940, и др.), соотношение ранней и поздней древесины (Мелехов, 1932, 1934; Стрекаловский, 1939 и др.), длину элементов (Gerry, 1916; Lee а. Smith, 1916; Яценко-Хмелевский, 1946), количество сосудов и лучей (Яценко-Хмелевский, 1946; Вихров, 1954), не изменяют важнейших качественных признаков строения древесины — ее состав,

тип перфораций и поровость сосудов, очертание и распределение просветов в годовичном кольце, состав и рядность лучей, характер расположения древесной паренхимы и другие признаки, являющиеся диагностическими в определении древесины.

Положение это давно уже известно в анатомии древесины (например, Яценко-Хмелевский, 1948). Эта константность признаков относится, как показали наши наблюдения, как к древесине ствола, так и к древесине корня. Однако зрелая структура корней и стволов разнится во всех исследованных растениях.

Состав элементов, слагающих древесину корней, обычно таков же, как и в стволе. Лишь в корнях каштана отмечаются волокнистые трахеиды, отсутствующие в зрелой древесине стволов. Тип перфораций сосудов в корнях может быть иным, чем в стволе. Так, в древесине корней ольхи и бука наряду с типом перфораций, характерным для стволов, наблюдаются сетчатые перфорации (рис. 1). Некоторые различия между корнем и стволом намечаются и в типе межсосудистой поровости. У бука расположение пор в корнях очередное и супротивное, в стволе только очередное. Супротивный тип поровости, характерный для большинства корней каштана, в стволе отмечается лишь изредка. Очередная поровость, часто встречающаяся наряду с супротивным расположением пор в стволе ольхи, в корнях бывает очень редко.

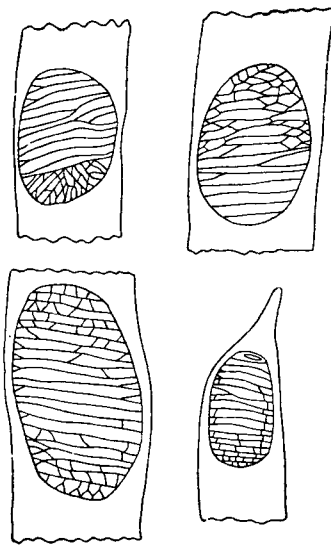


Рис. 1. Сетчатые перфорации в корне ольхи. Ув. 224.

Лучи, как правило, в корнях всегда состоят из большего числа клеток в ширину, чем в стволах. Так, в корне березы лучи одно-пятирядные, у ольхи — одно-двухрядные, у лещины — одно-четырёхрядные, у граба — одно-пятирядные, у каштана — одно-двухрядные (рис. 2). Более широкие, чем в стволе, лучи в корнях отмечали Нердлингер (1868) у дуба и граба, Моллиар (Molliard, 1899) у представителей *Pomaceae*, Гелегер (Gallager, 1906) у представителей *Cupuliferae* и *Meliaceae*, Бейли (Bailey, 1912) у *Castanea dentata* Borkh., Ферер (Feher, 1924) у *Robinia pseudoacacia* L., Голден (Holden, 1912) у *Aesculus*. Лучи (в своей окончательной структуре) в корнях всегда с большей или меньшей тенденцией к гетерогенности или резко гетерогенные даже у тех растений, в зрелой древесине ствола которых лучи строго гомогенные (рис. 3). В большинстве случаев лучи корней составлены из квадратных и стоячих клеток, причем последние обычно расположены по краям лучей.

Поры между клетками лучей и паренхимы и сосудами всегда значительно более вытянутые и более многочисленные в корнях по сравнению со стволом, часто расположенные в правильном вертикальном ряду («лестничные») (рис. 4).

Наиболее значительны различия между зрелой древесиной корня и ствола у растений с высокоорганизованной древесиной. Корень каштана, например, характеризуется рассеянно-сосудистой древесиной, терминальной паренхимой, двухрядными гетерогенными лучами (рис. 5, 6), т. е. признаками, полностью отсутствующими в зрелой древесине ствола.

Структура корня неодинакова по его длине. Наибольшее сходство со стволем обнаруживает древесина корня, образованная возрастно молодой корневой меристемой несколько ниже корневой шейки (рис. 7, а, б). По мере удаления от надземной части растения структура корня становится все менее и менее схожей со стволом. Главный корень дуба в своей верхней части (10 см от почвы) еще имеет много общих черт со стволом.

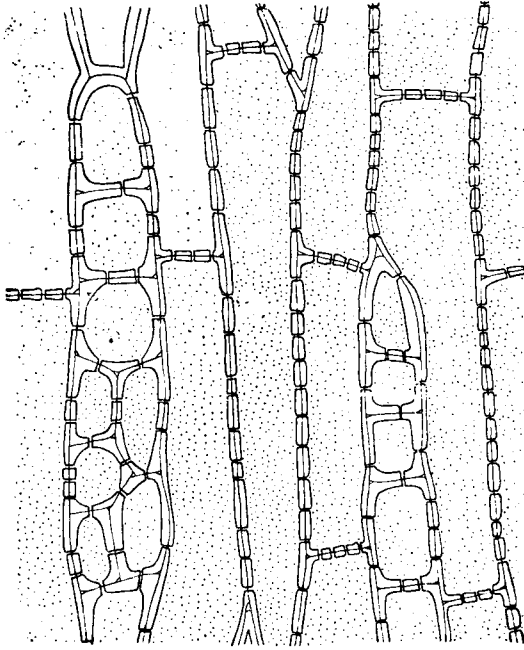


Рис. 2. Одно-двухрядные лучи в корне каштана. Тангентальный срез. Ув. 224.

С удалением от шейки изменяется характер распределения сосудов, состав и строение лучей, соотношение тканей. Корень, расположенный на глубине 70—100 см от поверхности почвы, характеризуется радиальным расположением сосудов, однорядными гетерогенными лучами, наличием волокнистых трахейд в составе механической ткани, громадным количеством паренхимы, составляющей основную массу древесины (рис. 8, а, б).

Боковые корни незначительно изменяются в своей структуре по длине. Боковые корни дуба у основания (в 1—2 см от основания растения) чрезвычайно напоминают строение главного корня на том уровне, от которого они отходят. По всей своей остальной длине боковые корни резко отличаются не только от древесины ствола, но и от главного корня. Характерными для них являются широкие полосы агрегатных лучей, отходящие от

центра корня, и радиальное распределение сосудов в промежутках между лучами (рис. 9, а, б). Непонятны утверждения И. М. Лабунского (1951, 1953), что «при сравнении поперечных срезов ветвей и боковых корней дуба можно видеть, что между ними существует большее сходство, чем между стержневыми и боковыми корнями», тем более, что прилагаемые автором фотоотпечатки показывают кольцо-сосудистое строение ветки и радиально расположенные сосуды в боковом корне. По нашим наблюдениям, древесина зрелой ветки ничем не отличается от зрелой древесины ствола и по существу автор, находя сходство между боковым корнем и веткой, тем самым находит его между боковым корнем и стволом. Различия между главными и боковыми корнями также настолько отчетливы, что дают возможность безошибочно их разграничивать.

В некоторых случаях поверхностные боковые корни оказываются возможным отличать от главных по продолговато-яйцевидному поперечному спилу. Такая форма боковых корней возникает в результате неравномерного прироста — нижняя сторона корня нарастает значительно медленнее, и рост в толщину в основном происходит только на боковых и на верхней сторонах. Неравномерный прирост древесины поверхностных боковых корней объясняется разностью температур почвы, большей прогреваемостью верхних слоев почвы. По наблюдениям А. П. Тыртыкова

(1951), явление термотропизма корней отмечается лишь на почвах с резким падением температуры с глубиной, на почвах же, равномерно прогреваемых, этого явления не обнаруживается.

Общей для всех исследованных корней чертой является значительно большее, чем в стволе, развитие паренхимной ткани, доля которой постепенно увеличивается по мере удаления от надземной части растения. В среднем на расстоянии около 100 см как в главном, так и боковом корнях основная часть древесины составлена тяжелой паренхимой.

Значительно большее, чем в стволе, развитие паренхимной ткани в корнях отчасти следует объяснить различиями механических функций корня и ствола. Однако гораздо более существенным фактором является несомненно то, что корень представляет собой физиологически значительно более активный орган, нежели ствол, и потому естественно большее поступление в его ткани питательных веществ.

Еще совсем до недавнего времени отток ассимилянтов в корень расценивался в основном как процесс накопления запасных веществ, необходимых для роста и развития надземных органов растений. Такое ограниченное представление о расходе запасных питательных веществ и о причинах их поступления в корень можно объяснить лишь тем, что изучение корневых систем и процессов, протекающих в них, отстало от развития представлений о роли надземных органов, в частности листьев. Деятельность корня многообразна и, как отмечает Д. А. Сабинин (1949), значение корневой системы в жизнедеятельности растений выходит за пределы органа, снабжающего надземные части водой и необходимыми элементами минерального питания. Так, например, в корнях могут протекать процессы вторичного синтеза, образовываться алкалоиды и ферменты, витамины. Работами советских физиологов установлено, что процесс поступления минеральных веществ и воды является активным физиологическим процессом, требующим для своего осуществления затрат определенного количества энергии (Курсанов, 1957).

Д. А. Сабинин (l. c.) считает, что дыхание является совершенно необходимым условием для успешного поступления в клетку анионов. Таким образом, жизнедеятельность корня тесно связана с процессами обмена веществ, при которых происходит переработка ассимилянтов, получаемых корнем от надземных органов. Энергия, освобождающаяся при переработке органических веществ, которыми ассимилирующие органы снабжают корневые системы, используется для перемещения воды, концентри-

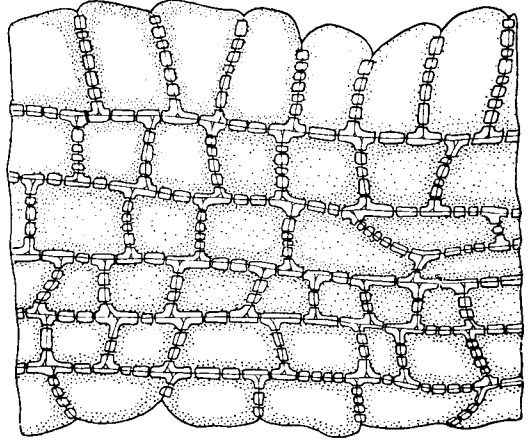


Рис. 3. Гетерогенный луч в главном корне дуба. Радиальный срез. Ув. 224.

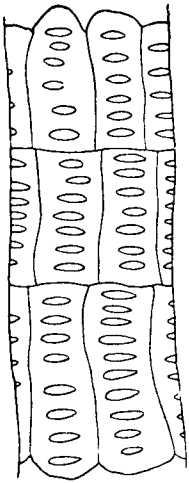


Рис. 4. Поры между клетками лучей и сосудами в корнях бука. Ув. 320.

рования солей и, наконец, для образования некоторых физиологических активных веществ — растительных гормонов. Для бесперебойной работы корня часть поступающих в его ткани органических веществ откладывается в запас — в темные часы суток, в холодное или сухое время, когда растения, как известно, не ассимилируют. Запас питательных веществ нужен корню не только в периоды такого вынужденного покоя и нарушений регулярного оттока ассимилянтов вниз, но также, например, весной, пока листья еще не распустились, и поздней осенью, после опадения листьев. Потребность в питательных веществах в эти периоды возникает в силу ростовых процессов, начинающихся в корне до распускания листьев и продолжающихся еще после их опадения. Рост

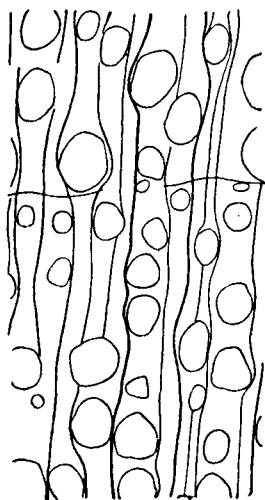


Рис. 5. Схема распределения сосудов в корне каштана. Поперечный срез. Малое увеличение.

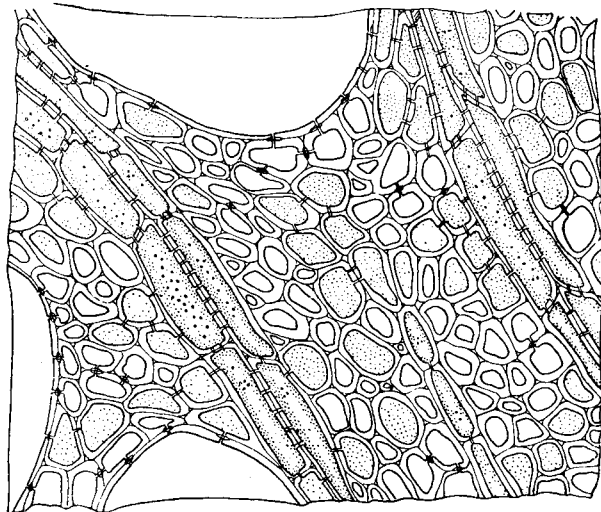


Рис. 6. Одно-двухрядные лучи в корне каштана, обилие паренхимы. Поперечный срез. Ув. 224.

корней протекает не непрерывно, а так же, как и у побегов, периодически. Однако периодичность роста корней несколько различается от таковой у побегов.

Французский ботаник и лесовод Дюамель дю Монсо (Duhamel du Monceau, 1758, 1760), изучавший жизнь лесных деревьев, отметил, что рост корней происходит и в зимнее время. Аналогичные же сведения мы находим у В. Бюнгена (1902). Период роста корней не всегда совпадает с образованием новых побегов. Так, в Дании у взрослых деревьев *Sorbus aucuparia* L. и *Padus racemosa* (Lam.) Gilib. новообразование корней наблюдается уже в феврале, у *Acer pseudoplatanus*, L. *Ulmus montana* With., *Quercus pedunculata* Ehrh., *Fraxinus excelsior* L. — в марте. В июле рост корней у всех деревьев прекращается и начинается вновь в августе-сентябре (излагаем по Серебрякову, 1952). На резкое сокращение роста корней в период начала роста побегов указывают А. П. Драговцев (1938) и С. А. Самцевич (1951). Для деревьев, выросших на северном пределе лесов, этой закономерности не наблюдается и максимум роста побегов совпадает с интенсивным ростом корней (Тыртиков, 1954).

Исследованиями некоторых других авторов (Nightingale, 1935; Ладефагет, 1939 — по Серебрякову, 1952; Grossmann, 1940, и др.) также по-

казано, что, хотя интенсивность новообразования корней падает на весенне-осенние месяцы, рост корней у древесных растений начинается задолго до образования листьев. Росту корней в толщину также свойственна определенная ритмичность. Но период деятельности камбия в корнях продолжается гораздо дольше, чем в надземных органах (Mohl, 1862, и др.), а именно тогда, когда деревья уже полностью обезлиственны.

Из всего изложенного вытекает, что корень является таким же активным потребителем органических веществ, как и молодые растущие части растения, созревающие плоды и семена. С потреблением связано движе-

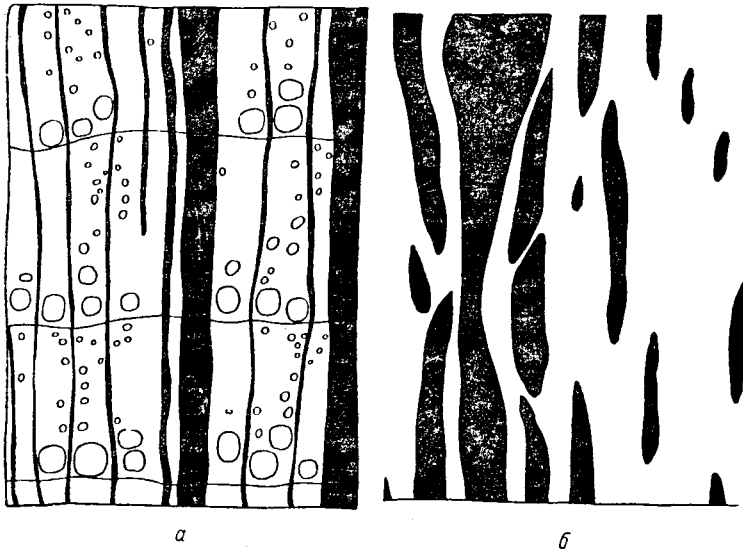


Рис. 7. Главный корень дуба в 10 см от корневой шейки. Малое увеличение.

а — схема поперечного среза; б — схема тангентального среза.

ние пластических веществ и отложение их в запас. Весной часть запасных питательных веществ поднимается в надземные части и идет в основном на развертывание почек. Другая часть потребляется самим корнем.

К сожалению, приходится констатировать, что связь определенных типов структуры с интенсивностью выполнения растением тех или иных функций далеко еще не ясна. Экспериментальных исследований в этом направлении почти нет, и сведений о выполнении определенных назначений теми или иными структурами немного.

Губер (Huber, 1935) при определениях испарения и скорости транспирационного тока воды у деревьев установил, что деревья с кольце-сосудистой древесиной испаряют воды больше и обнаруживают скорость тока воды от корня к листьям в среднем раз в десять большую, чем деревья с рассеянно-сосудистой древесиной.

Николов (Nicoloff, 1911) показал, что в гетерогенных лучах имеется два типа физиологически различных клеток, а именно: стоячие клетки лучей связаны с функцией отложения веществ, лежащие клетки выполняют роль путей передачи пластических веществ в древесине в радиальном направлении. Возможно, что сохранение в корне гетерогенных лучей, в то время как в стволе развитие лучей пошло дальше и завершилось образованием гомогенных лучей, как раз и обусловилось превалированием

в корне функций запасаания питательных веществ. Этим же, безусловно, объясняется большая ширина лучей в корнях.

Возможно также предполагать, что развитие в корне некоторых других примитивных признаков связано со своеобразием его обитания и выполняемых им функций.

Стадгалтер (Studhalter, 1955) довольно метко сравнивает условия жизни в земле с условиями влажно-тропического леса. Однородностью условий существования (условия температуры, влажности и т. д.) в почве, вероятно, объясняется плохая выраженность годичных колец, рассеянно-

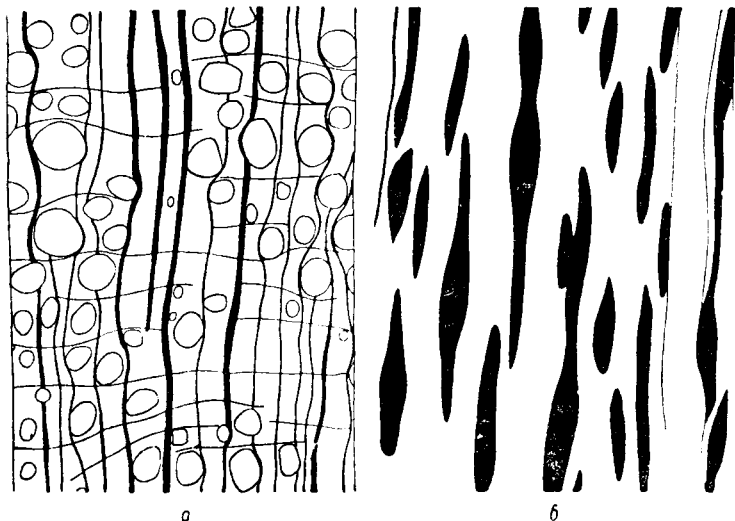


Рис. 8. Главный корень дуба в 100 см от корневой шейки.
Малое увеличение.

а — схема поперечного среза; б — схема тангентального среза.

сосудистость и, может быть, некоторые другие признаки. Поэтому наличие в структуре древесины корня некоторых более примитивных, чем в стволе, признаков скорее связано с его биологическими особенностями, но не с его общей примитивностью, не понятной для столь физиологически активного органа. В этом отношении представляются интересными исследования М. А. Шанидзе (1955). Автор, изучавшая строение вегетативных органов представителей рода *Iris*, приходит к выводу, что наиболее высокой эволюционной пластичностью обладает стела корня — в процессе эволюции из высокой полиархной организации произошли низкая полиархная, а затем тетрархная организация корня. Отдельные стадии онтогенетического развития корня ирисов отражают филогенетические изменения структуры корня.

Следует отметить, что вопрос о происхождении и эволюции отдельных вегетативных органов растения представляется одним из самых сложных в филогении растений, занимавшим умы нескольких поколений ботаников-филогенетиков. Тем не менее и по настоящее время история происхождения органов не вполне ясна и ни одна из теорий не дает исчерпывающего объяснения их происхождения и эволюции. Поэтому и по сей день вопрос о морфологической природе осевых органов привлекает к себе внимание исследователей. Так, на VIII Международном конгрессе ботаников в Париже в 1954 г. он обсуждался в докладах Циммерманна (Zimmermann,

1954а, 1954б), Эрендорфера (Ehrendorfer, 1954), Бекереля (Bequerel, 1954), а на Международном совещании по эволюции и филогении растений, состоявшемся в Париже в 1952 г., ему был посвящен доклад Амберже (Emberger, 1952).

Теория Амберже заключается в следующем: вегетативное тело сосудистого растения образовано осью. Корень и лист являются ее модификациями, возникшими в филогенезе и получившими известную морфологическую самостоятельность. Резкой границы между этими тремя органами нет. Возникли они рано, так как намечаются уже у водорослей. Корень — это ось, эволюционные преобразования анатомического строения которой пошли в ином направлении, чем у стебля, но остановились

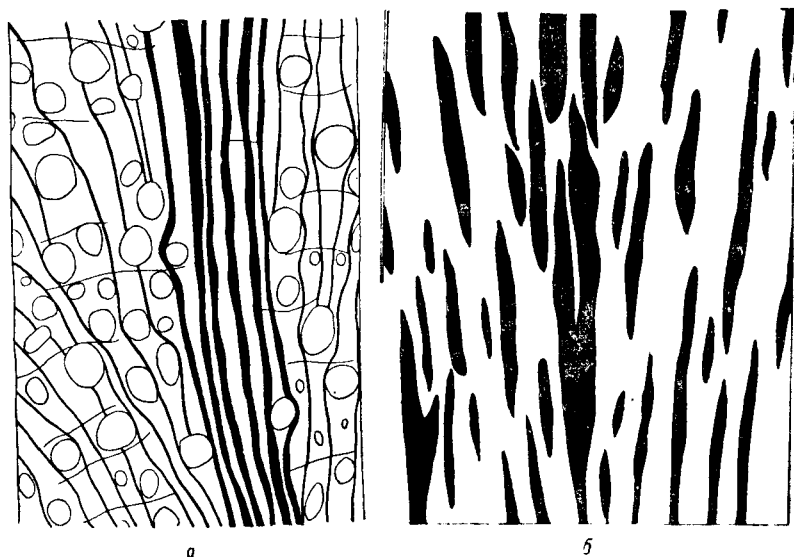


Рис. 9. Боковой корень дуба в 50 см от главного корня. Малое увеличение.

а — схема поперечного среза; б — схема тангентального среза.

на примитивной филогенетической ступени — протостелии. Иллюстрацией этому служат строение корней папоротников, корневого аппарата плауновых, существование образований с функцией корней, но со стеблевым анатомическим строением (*Asteroxylon*) и стеблевые образования со структурой корня (*Psilotum*, проростки у покрытосемянных). Корень отличается от стебля в основном только своей физиологической ролью.

Наши исследования структуры древесины обнаженных корней и укоренившейся ветки дают возможность утверждать, что примитивные признаки древесины корня не закреплены наследственно, так как они могут появляться и исчезать в зависимости от условий существования органа растения. Это в равной мере относится не только к примитивным признакам древесины, но и к высокоорганизованным. Так, обнаженные корни каштана приобретают ряд признаков высокой организации, свойственных древесине ствола и отсутствующих в корнях, погребенных в земле — кольце-сосудистость, почти гомогенные лучи, скудноцентричную паренхиму. Сходство древесины обнаженных корней с древесиной ствола наблюдалось также Моррисоном (Morrison, 1953), исследовавшим строение погребенных и обнаженных корней шести новозеландских древесных по-

род. А. А. Никитин (1952) указывает на обратное явление, а именно на то, что часть стеблей, расположенная в земле, проявляет некоторые черты, обычно свойственные корням. В качестве примера автор приводит молодые растения ореха (*Juglans regia*). Подземным частям их стеблей свойственны отсутствие колленхимы, мощное развитие периферической части коры, более широкие клетки сердцевинных лучей, трудно различимые годичные кольца, более крупные сосуды.

Как показали наши наблюдения, с укоренением ветки дуба происходят некоторые изменения в ее структуре, изменяющие общий облик древесины, поскольку при этом появляются примитивные признаки, свойственные обычно корням дуба — радиальное распределение сосудов, гетерогенные лучи. Прав поэтому Амберже (l. c.), утверждающий, что основное различие между стеблем и корнем — в их физиологической роли, поскольку структурные различия в их строении (в данном случае мы имеем в виду строение вторичной древесины), как только что было показано, могут исчезать при определенных условиях существования органов.

Таким образом, структура древесины корней и стволов букоцветных всегда более или менее значительно различается. Наибольшее сходство с древесиной ствола обнаруживает древесина главного корня под корневой шейкой. По мере удаления от шейки корня структура корня становится все менее и менее схожей со стволом. Древесина боковых корней отличается не только от древесины ствола, но и от древесины главного корня. По длине боковые корни изменяются структурно менее значительно, чем главный корень.

Отличия в строении древесины корня и ствола, однако, модификационные и при обнажении корней или, напротив, укоренении веток имеют тенденцию сглаживаться или даже вовсе исчезать. Из этого вытекает, что существовавшие представления об изначальной примитивности признаков строения корня не обоснованы. Различия между корнем и стеблем — в части признаков строения древесины, во всяком случае — связаны с различиями в условиях существования и в функциях. Изменения в структуре отдельных признаков, связанные с изменениями условий обитания органа, а следовательно, по-видимому, и с какими-то изменениями физиологических импульсов, являются прекрасным доказательством того, что ни один морфологический признак не наследуется как таковой. Следует вполне согласиться с Д. Симпсоном (1948), утверждающим, что вообще наследуются не отдельные признаки, а комплекс возможностей развития, и окончательное морфологическое выражение одних и тех же наследственных факторов может быть весьма различным. Иными словами, наследуется не признак, а потенциальная возможность его развития, и данное выражение того или иного признака возникает как одно из многих, возможных у данного растения. Потенциальная возможность, безусловно, реализуется в рамках родового или даже видового диапазона признаков, и, как бы ни была различна древесина корней и стволов исследованных нами растений, все же всегда мы имеем некоторые общие черты, объединяющие корень и ствол одного рода и отличающие их от корней и стволов других родов.

ЛИТЕРАТУРА

- Б ю с г е н В. Заметки о форме древесных корней и способе их роста. Лесн. журн., № 6, 1902.
В и х р о в В. Е. Строение и физико-механические свойства древесины дуба в связи с условиями произрастания. М.—Л., 1954.

- В и х р о в В. Е. и С. А. Т у м а н я н. Анатомическое строение и физико-механические свойства древесины корней дуба. Изв. АН Арм. ССР, т. 6, в. 11, 1953.
- Д р а г о в ц е в А. П. К вопросу об изучении биологии корней. Сов. субтропики, т. 6, 1938.
- Ж и л к и н Б. Д. К вопросу о влиянии условий лесопроизрастания на анатомическое строение, физические и механические свойства древесины сосны. Тр. Брянск. лесн. инст., т. 1, 1936.
- К о с с о в и ч Н. Л. Исследование различий анатомического строения древесины северной и южной стороны ствола хвойных. Бот. журн. СССР, т. 20, в. 5, 1935.
- К у р с а н о в А. Л. Корневая система как орган обмена веществ. Тез. докл. делегатск. съезда ВБО, т. 2, 1957.
- Л а б у н с к и й И. М. Некоторые особенности строения и роста корневой системы дуба. Агробиология, т. 5, 1951.
- Л а б у н с к и й И. М. Новое в учении о засухоустойчивости растений. Природа, т. 9, 1953.
- М е л е х о в И. С. О качестве северной сосны. Архангельск, 1932.
- М е л е х о в И. С. Древесина северной ели. Гослестехиздат, 1934.
- М е л е х о в И. С. Об изменении анатомического строения древесины сосны под влиянием лесных пожаров. Архангельск, 1940.
- Н е р д л и н г е р. Технические свойства древесины. Пер. Шафранова, СПб., 1868.
- Н и к и т и н А. А. К вопросу об анатомическом строении корней главнейших плодовых пород Южной Киргизии. Тр. Бот. инст. АН СССР, «Растительное сырье», т. 3, 1952.
- П ы с л а р ь Г. И. Анатомическое строение корня главнейших подвоев плодовых деревьев. Тр. Молдавск. с.-х. инст., 1, 1936.
- С а б и н и н Д. А. О значении корневой системы в жизнедеятельности растений. 9-е ежегодн. тимиразевское чтение, 3 июня 1948 г., Изд. АН СССР, 1949.
- С а в и н а А. В. Влияние рубок на строение древесины осины. Тр. ВНИИЛХ, в. 2, 1939.
- С а м ц е в и ч С. А. Влияние почвенных и климатических условий на рост корней у древесных растений. Праці Інст. лісівництва, т. 2, Київ, 1951.
- С е р е б р я к о в И. Г. Морфология вегетативных органов высших растений. М., 1952.
- С и м п с о н Д. Ч. Темпы и формы эволюции. М.—Л., 1948.
- С т р е к а л о в с к и й Н. М. О технических свойствах древесины сосны бассейна р. Ваги. Архангельск, 1939.
- Т ы р т и к о в А. П. О термотропизме корней в природе. ДАН СССР, т. LXXIII; № 6, 1951.
- Т ы р т и к о в А. П. Рост корней деревьев в длину на северном пределе лесов. Бюлл. МОИП, т. 60, в. 1, 1954.
- Ч е р н я е в П. О строении средней части в корнях древесных двусемядных растений. Естеств.-историч. исследования в Петербургск. губ., т. 1, 1864.
- Ш а н и д з е М. А. К вопросу филогенеза рода *Iris*. Автореферат. Бот. инст. АН Груз. ССР, Тбилиси, 1955.
- Ш а т е р н и к о в а А. Н. О влиянии различного стояния грунтовых вод в почве на анатомическое строение сосны. Тр. по лесн. опытн. делу, в. 2, 1929.
- Я ц е н к о - Х м е л е в с к и й А. А. Изменения в составе и строении древесины восточного бука (*Fagus orientalis* Lipsky.) в зависимости от возраста, высоты над почвой и внешних условий. Изв. АН Арм. ССР, т. 5, 1946.
- Я ц е н к о - Х м е л е в с к и й А. А. Принципы систематики древесины. Тр. Бот. инст. АН Арм. ССР, т. 5, 1948.
- V a i l e y I. W. The evolutionary history of the foliar ray in the wood of the Dicotyledons and its phylogenetic significance. Ann. Bot., v. 26, № 103, 1912.
- W e a k b a n e A. B. and E. C. T h o m p s o n. Anatomical studies of stems and roots of hardy fruit trees. II. The anatomical structure of the roots of some vigorous and some dwarfing apple rootstocks and the correlation of structure with vigour. J. Pomology, v. 17, 1939.
- W e a k b a n e A. B. and E. C. T h o m p s o n. Anatomical studies of stems and roots of hardy fruit trees. III. The anatomical structure of some clonal and seedling apple rootstocks stem-and root-grafted with a scion variety. J. Pomology, v. 18, 1941.
- W e q u e r e l P. La théorie du telome basée sur les Rhynia n'est pas conforme à la constitution et à l'évolution des plantes vasculaires. 8-c Congr. Int. de Bot., Paris, 1954.
- C r o s s m a n n K. F. Citrus roots. Their anatomy, osmotic pressure and peridiocity of growth. Palestine L. Bot., v. 3, № 1—2, 1940.
- D u h a m e l du M o n c e a u. La physique des arbres, etc. Paris, 1758.
- D u h a m e l du M o n c e a u. Des sémis et plantation des arbres, etc. Paris, 1760.

- Ehrendorfer F. Phylogenie der Cormophyten. 8-e Congr. Int. de Bot., Paris, 1954.
- Emberger L. Tige, racine, feuille. *Annee biol.*, v. 56, 1952.
- Fegel A. Comparative anatomy and varying physical properties of trunk, branch and rootwood in certain north eastern trees. *Tech. Publ.*, № 1, St. Coll., v. 55, 1941.
- Fehér D. Anatomie der vegetativen Organe der *Robinia pseudoacacia* L. Teil 3. Anatomie der Wurzel. *Erdesz. Lap.*, v. 63, 1924.
- Gallager W. I. Contributions to the root anatomy of the Cupuliferae and Meliaceae. *Brit. Association Report*, 749, 1906.
- Gerry E. A comparison of tracheid dimensions in longleaf pine and Douglas fir, with data on the strength and length, mean diameter and thickness of wall of the tracheids. *Science*, v. 43, № 1106, 1916.
- Holden R. Some features on the anatomy of the Sapindales. *Bot. Gaz.*, № 53, 1912.
- Huber B. Die physiologische Bedeutung der Ring- und Zerstreutporigkeit. *Ber. deutsch. bot. Ges.*, v. 53, 1935.
- Lee H. N. and E. M. Smith. Douglas fir fibers with special references to length. *Forest. Quarterly*, v. 14, 1916.
- Liese I. Beiträge zur anatomie und physiologie des wurzelholzes. *Ber. deutsch. bot. Ges.*, v. 42, № 91, 1924.
- Mohl H. Einige anatomische und physiologische Bemerkungen über das Holz der Baumwurzeln. *Bot. Ztg.*, № 20, 1862.
- Mollard M. Revue des travaux l'anatomie végétale parus en 1895 et 1896. *Rev. gén. Bot.*, v. 11, 1899.
- Morrison T. M. Comparative histology et secondary xylem in buried and exposed roots of dicotyledonous trees. *Phytomorphology*, v. 3, № 4, 1953.
- Nicoloff Th. Contribution à l'histologie et à la physiologie des rayons medullaires chez les Dicotyledones arborescentes. *Rev. Gen. Bot.*, v. 23, 1911.
- Nightingale G. T. Effects of temperature on growth, anatomy and metabolism of apple peach roots. *Bot. Gaz.*, № 96, 1935.
- Noelle W. Studien zur vergleichenden Anatomie und Morphologie der Koniferen Wurzeln mit Rücksicht auf die Systematik. *Bot. Ztg.*, № 68, 1910.
- Pohl F. Vergleichende Anatomie von Drainagezöpfen, Land — und Wasserwurzeln. *Beihefte L. bot. Zentralbl.*, v. 42, 1926.
- Pohl F. Ein Beitrag zur Abhängigkeit der Gefassweite des Wurzelholzes von ausseren Faktoren. *Forstw. Zentralbl.*, v. 49, 1927.
- Riedle H. Bau and Leistungen des Wurzelholzes. *Dissertation*. Leipzig, 1937.
- Schacht U. Z. Anatomie und Physiologie des Gewachse. Berlin, 1859.
- Studhalter R. A. Tree growth. I. Some historical chapters. *Bot. Rev.*, v. 21, № 1—3, 1955.
- Zimmermann W. Phylogenie der Mikrophylle Sprosse. 8-e Congr. Int. de Bot., Paris, 1954a.
- Zimmermann W. Stelartheorie und Telomtheorie. 8-e Congr. Int. de Bot., Paris, 1954b.

К АНАТОМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ АРКТИЧЕСКОЙ ИВЫ (*SALIX ARCTICA* PALL.)

Л. А. ЛЕБЕДЕНКО

Растения, обитающие в определенных, крайне специфических условиях, представлены, как известно, видами с таким набором признаков, который значительно отличает их от других видов, произрастающих в обычных условиях существования. Так, в процессе эволюции обособились группы полупустынных, пустынных, высокогорных, арктических и иных видов.

Строение древесины растений аридных местообитаний в свое время явилось предметом многих исследований, и в литературе накоплено довольно значительное количество данных, освещающих влияние этих условий на структуру древесины. Сводка этих данных приведена в работе А. А. Яценко-Хмелевского (1948).

Совсем скудны, однако, наши сведения о строении древесины видов, произрастающих в условиях арктического климата.

Известное нам описание полярной ивы выполнено еще в 1890 г. Кильманом (Kihlmann, 1890), и естественно, что оно не охватывает многих структурных признаков, представляющих интерес для современной науки.

Материалом для нашего исследования послужила ива, произрастающая в зоне полярной пустыни на севере Таймырского полуострова, вблизи мыса Челюскина — крайней северной точки Евразийского материка.¹

Средняя годовая температура здесь — 16° С. Средние летние температуры 4—5°, максимальные 20°. Средние зимние температуры — 25°, минимальные — 53°. Продолжительность лета — 2 месяца.

Почва на месте произрастания ивы глинистая, с большим содержанием песка. Верхний слой почвы слабо гумифицирован, толщина его 1—5 см. Максимальная глубина деятельного слоя 0.5 м.

Растения встречаются в виде отдельных распростертых кустов, которые местами образуют своеобразные небольшие «рощицы», площадью от 400 до 2000—3000 м². От главного стебля отделяется много коротких, толстых, совершенно голых ветвей, до 50 см длиной, обладающих способностью укореняться. Мощная корневая система распластана параллельно поверхности.

Описание растений позволило дать следующую их характеристику.

Листья по форме обратно яйцевидные, в основании слабо суженные, 1.5—2 см длиной и 1—1.5 см шириной, цельнокрайные, сверху блестящие, темно-зеленые, снизу немного сизоватые, со слабо выступающей сетью жилок; главная жилка покрыта тонкими прямыми волосками или без них.

Сережки верхушечные, 2—3 см длиной, на длинных ножках; тычинок 2, свободных, голых; столбик хорошо развитой, двураздельный; рыльца часто до половины расщепленные.

¹ Несколько экземпляров ивы, собранных сотрудниками Научно-исследовательского института геологии арктики Л. Д. Мирошниковым и О. С. Щегловой, были переданы в Лабораторию древесиноведения Института леса АН СССР, где и выполнена эта работа.

Растение определено нами как *S. arctica* Pall.

Древесина ивы арктической светлоокрашенная, беловато-серая; ядра не образуется. Годичные кольца не различимы. Лучи на продольных срезах невооруженным глазом мало заметны, на поперечных не видны вовсе. Просветы сосудов простым глазом также не видны.

Анатомическое исследование древесины показало, что она состоит из сосудов, волокон либриформа, тяжевой, веретенovidной и лучевой паренхим.

Членики сосудов с короткими клювами или без них. Перфорации простые, несколько вытянутые или округлые, расположены на скошенных поперечных стенках.

Межсосудистая поровость очередная; поры чаще сомкнутые, реже сближенные, еще реже свободные. Соответственно степени сближенности пор окаймления пор меняются со всеми переходами от шестиугольных до строго округлых. Внутренние отверстия пор щелевидные, узкие, часто длинные, но не переходящие границы окаймления. В некоторых случаях внутренние отверстия пары пор не совпадают, и тогда они располагаются под некоторым углом друг к другу.

Волокна либриформа, составляющие основную массу древесины, характеризуются заостренными, иногда штыкообразными или вильчатыми окончаниями. Поры на стенках волокон либриформа немногочисленные, угловатые и щелевидные, простые, расположены преимущественно на радиальных и реже на тангентальных стенках. Довольно часто поры имеют более или менее заметное (при увеличении 600) остаточное окаймление. Изредка встречается перегородчатый либриформ.

Годичные кольца чрезвычайно узкие, в среднем около 0.1—0.15 мм, но почти всегда довольно хорошо очерченные. Граница годичных колец часто волнистая и нередко прерывающаяся. Терминальная древесина составлена из одного-трех слоев волокон либриформа, сплюснутых в радиальном направлении.

Сосуды приурочены в основном к внутренней границе слоя, и благодаря узости годичных колец создается впечатление кольце-сосудистого расположения просветов. Нередко по ширине годичного кольца помещается лишь один крупный сосуд. Просветы большей частью одиночные, реже в цепочках из трех-семи просветов или в небольших группах. В поздней древесине, доля которой в годичных кольцах очень незначительна, отмечаются только узкие сосуды, чаще же совсем отсутствуют. В более широких годичных кольцах расположение сосудов явно рассеяно-сосудистое, и сосуды всех размеров в беспорядке разбросаны по годичному кольцу. Просветы сосудов угловатые или угловато-округлые (рис. 1, а, б).

Древесная паренхима развита очень слабо. По характеру распределения диффузная, тяжевая или веретенovidная; тяжи древесной паренхимы обычно в две-три клетки; на поперечном срезе редкие клетки древесной паренхимы заметны очень плохо, так как ни сечения их, ни толщина оболочек почти не отличаются от сечения и толщины оболочек древесных волокон.

Поры между клетками древесной паренхимы и сосудами простые, крупные, неправильно округлой формы, часто сомкнутые.

Лучи только однорядные, гетерогенные и гомогенно-палисадные.

На поперечном срезе лучи значительно уже диаметра сосудов. При встрече с сосудами лучи не всегда изгибаются. Тангентальные стенки клеток лучей прямые, плохо различимые. Лучи линейные. Граница годичного слоя в луче совпадает с общей границей годичного кольца. При переходе из одного слоя в другой лучи не расширяются.

На тангентальном срезе лучи узкие, линейные. Сечение клеток лучей изодиаметрическое, реже — вытянутое по оси ствола. У большинства лучей краевые клетки в сечении вытянуты.

На радиальном срезе лучи двух типов — гетерогенные и гомогенно-палисадные. Первые сложены главным образом из низких и длинных лежащих клеток, краевые слои которых составлены из квадратных или настоящих стоячих клеток. Изредка слои квадратных клеток составляют внутренние слои луча. Лучи второго типа слагаются целиком из квадратных или низко стоячих клеток.

Поры между клетками луча и сосудами крупные, неправильно округлые, в нескольких горизонтальных рядах, часто сомкнутые; встречаются они в клетках первых двух-трех краевых слоев и в нескольких (1—2) слоях в середине луча; клетки остальных слоев лишены пор. Тангентальные стенки клеток луча скошены. Стенки клеток лучей слабо утолщенные, с многочисленными порами.

Сравнивая анатомическую характеристику древесины арктической ивы со строением древесины других видов рода *Salix*, произрастающих в обычных, неспецифических местообитаниях, можно отметить некоторые отличия в их структуре. Наиболее значительны различия в количественных показателях.

Прежде всего резкие различия выступают в ширине годичных колец. У *S. alba* L., например, исследованной нами для целей сравнения с арктической ивой, годичные кольца приблизительно в 20—25 раз шире годичных слоев арктической ивы (см. таблицу и рис. 2, а, б). Узкие годичные кольца арктической ивы безусловно являются реакцией на внешние условия обитания.

Соответственно уменьшению ширины годичных колец изменились и другие количественные показатели структуры древесины.

Следует напомнить, что вопрос о связи между шириной годичного кольца и его анатомическим строением был предметом многочисленных

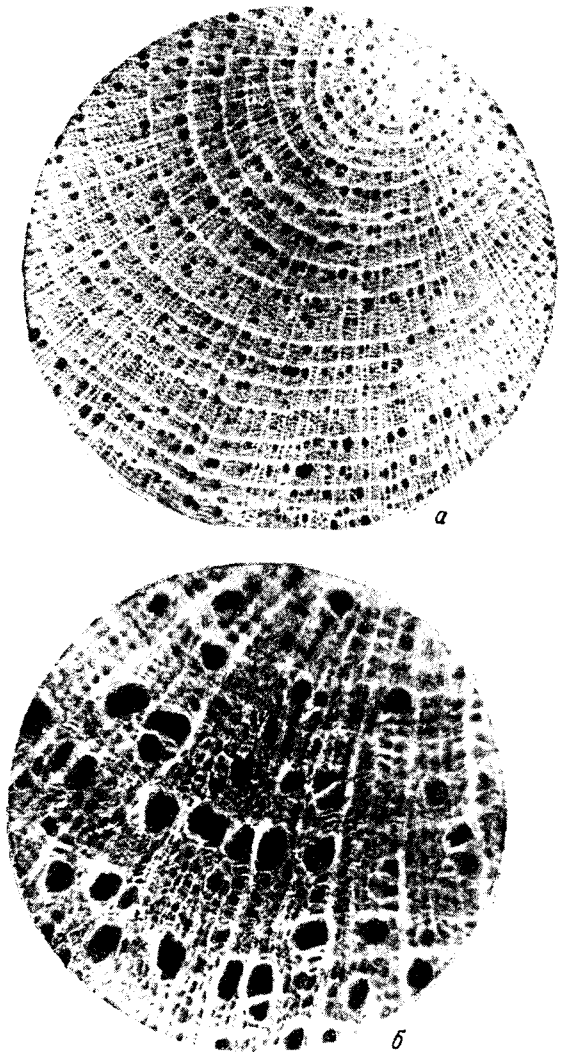


Рис. 1. Поперечные срезы ивы арктической.

а — ув. 8×7; б — 10×20.

исследований. Уже в прошлом веке было установлено, что существует определенный отклик древесины на угнетение, причем независимо от того, каким фактором это угнетение вызвано. Так, было показано, что у лиственных узкие годовичные кольца сочетаются с увеличением относительной

площади сосудов. В данном случае у арктической ивы, напротив, наблюдается даже некоторое уменьшение сечения водопроводных путей. По-видимому, для древесных растений, обитающих в обычных неблагоприятных внешних условиях, связанных, например, с сильным затенением, бедностью почвы, сохранение объема водопроводящих путей, что выражается в увеличении относительной площади сосудов при уменьшении их прироста, физиологически целесообразно, необходимо для снабжения кроны водой. Совсем, по-видимому, иная комбинация физиологических требований кроны и корневой системы наблюдается у арктических растений, причем сохранение «нормального» объема водопроводящих путей при пониженном приросте оказывается излишним.

Что касается длины анатомических элементов, в частности размеров члеников сосудов арктической ивы, то в этом она, пожалуй, не представляет исключения из того общего правила, что в результате угнетения (узкие годовичные кольца) длина члеников сосудов уменьшается.

В приведенной нами таблице заслуживают внимания также показатели количества лучей и их объем. Наглядно

различия в объеме лучей видны на рис. 3, а, б.

Уменьшение запасующей ткани — и не только лучей, но и древесной паренхимы, доля которой в древесине арктической ивы несравненно меньше, чем в древесине белой ивы, — вряд ли может ассоциироваться с угнетением вообще, вне зависимости от того, какой фактор это угнетение вызывает. Во всяком случае, в литературе такие данные отсутствуют. Между тем Форсайт (Forsait, 1920) сообщает, что у исследованных им четырех древесных альпийских видов отмечается определенная тенденция

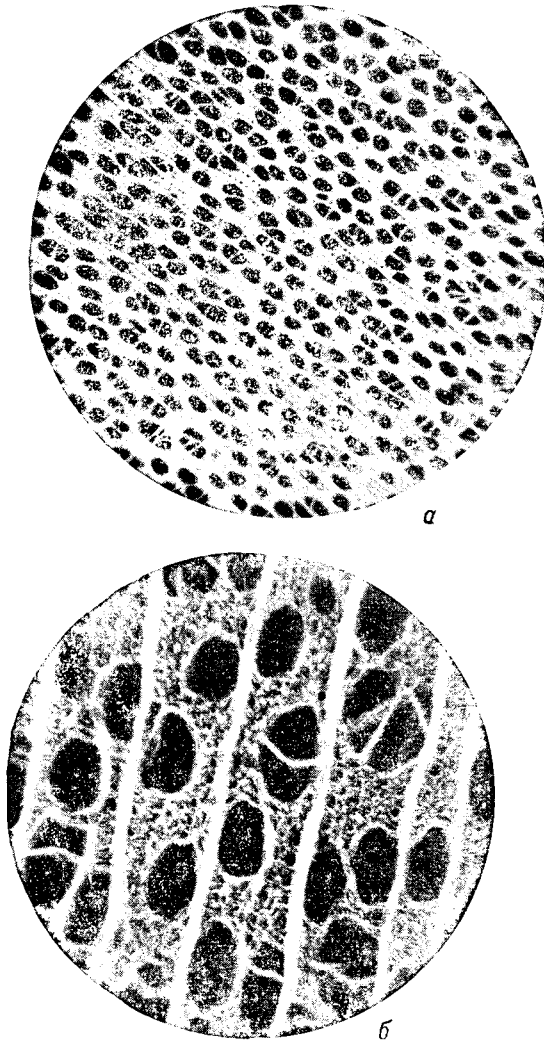


Рис. 2. Поперечные срезы ивы белой.
а — ув. 8×7; б — 10×20.

Размеры анатомических элементов древесины ивы арктической и ивы белой

Вид ивы	Средняя ширина годичного кольца, мм	Количество светов соеудов на 1 мм ²	Тангентальный диаметр просветов соеудов, р		Длина членков соеудов, р	Длина волокон либриформа, р	Высота лучей, р	Ширина лучей, р	Количество лучей на 1 мм ²	Объем лучей, %	Повтористость измерений
			в ранней древесине	в поздней древесине							
<i>Salix arctica</i>	0.1—0.25	35—50	30—50	15—25	200—300	500—600	80—250	10—16	3—5	4—6	50
<i>S. alba</i>	3—5	60—80	90—100	80—90	300—500	800—1400	120—400	15—32	8—10	8—10	50

к уменьшению объема лучей. Вполне возможно, что здесь мы имеем именно специфическую реакцию растений на определенное местообитание. Между прочим, Форсайт в этой же работе, исходя из того, что арктическая растительность во многом похожа на растительность высокогорий, проводит более глубокие аналогии между этими двумя типами местообитания. В физиологическом отношении, однако, растения этих местообитаний безусловно будут различными уже хотя бы потому, что фотопериодический режим их будет резко отличным. Как показали недавние исследования Мольского и Желявского (Molski i. Zelawski, 1958), формирование древесины тесно связано с продолжительностью освещения.

По поводу количественных показателей запасающей ткани любопытно отметить, что у многолетних растений, обитающих в аридных условиях (в полупустынях и пустынях), количество и объем лучей, как правило, увеличен (Bews, 1927; Webber, 1936).

Обратимся к структурным признакам. Оставляя в стороне общую характеристику древесины, которая приведена выше, остановимся только на признаках, отличающих древесину арктической ивы от древесины других видов рода *Salix*.

По распределению сосудов древесина арктической ивы характеризуется некоторой тенденцией к кольце-сосудистости. Такое размещение сосудов, однако, объясняется только чрезмерной узостью годичных колец, так как древесина более широких слоев явно рассеянно-сосудиста.

Далее, констатируется значительно большая, чем, например, у белой ивы (рис. 1, 2) угловатость просветов сосудов. Признаку очертаний отдельных сосудов придают определенное филогенетическое значение, и сосуды с угловатым сечением на поперечных срезах считаются относительно примитивным признаком структуры древесины. В систематическом отношении он имеет важное значение, хотя для многих видов и даже родов и является надежным диагностическим признаком (например, *Vaccinium*, *Epigaea* и др.). В большинстве же случаев очертание просветов может иметь у одного и того же вида все переходы от резко угловатого сечения до вполне округлого.

Граница годичных колец у арктической ивы более или менее волниста, тогда как у остальных исследованных представителей рода *Salix* она всегда ровная. Этот признак, как и ширина

прироста, прямо увязывается с температурным режимом местообитания арктической ивы.

Состав лучей показывает определенное различие между арктической и остальными ивами. Как известно, древесина ив характеризуется гетерогенными лучами (рис. 4, б) и по этому признаку ивы прекрасно отличаются от тополей с их гомогенными лучами. Гетерогенные лучи у тополей встречаются только в молодой древесине (в сеянцах или около сердцевины в ветках). Наличие гомогенных лучей наряду с характерными для ив гетерогенными лучами отличает арктическую иву от остальных видов ив. Гомогенные лучи арктической ивы, однако, не сходны с лучами тополей, так как у первой они составлены из квадратных или низкостоячих клеток (рис. 4, а) и относятся к категории гомогенно-палисадных лучей, у тополей же лучи слагаются из длинных лежащих клеток. Гомогенно-палисадные лучи, характерные для молодой древесины ствола и корней некоторых исследованных представителей букоцветных, рассматриваются нами как боковая ветвь в развитии лучей, получившая свое развитие уже на относительно высоких ступенях эволюции растений (Лебеде

енко, 1955).

Образование гомогенно-палисадных лучей с их квадратными клетками в древесине арктической ивы связано, по-видимому, с увеличением скорости деления камбиальных лучевых клеток в связи с очень коротким сроком вегетации в условиях полярного лета.

Резюмируя, отметим, что древесина арктической ивы безусловно отличается рядом количественных и качественных показателей, которые изменяют довольно существенно облик ее древесины и отличаются от других видов рода *Salix*, произрастающих в обычных, неспецифических условиях. При этом, однако, большую часть отличий, таких, как узкие годичные кольца, и коррелированную с этим меньшую длину древесных волокон не следует принимать за специфическую реакцию арктической ивы на определенный тип обитания, поскольку эти признаки вообще характерны для растений, испытывающих угнетение и притом независимо от того, какие условия это угнетение вызывают.

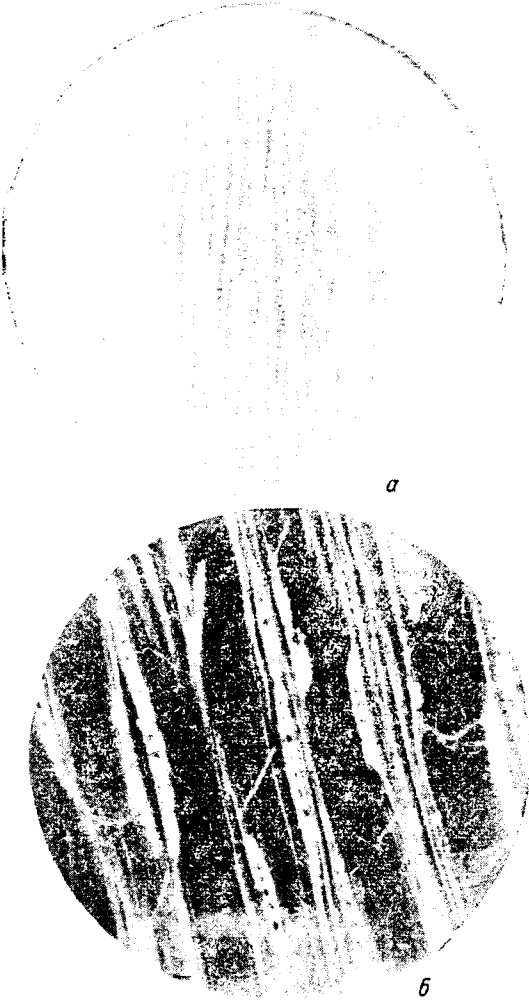
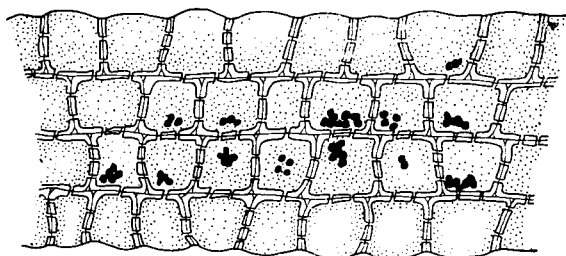


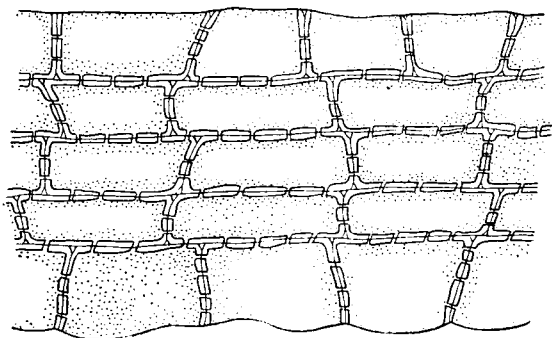
Рис. 3. Схема тангентальных срезов.
Ув. 8×10 .

а — ива арктическая; б — ива белая.

Ряд других признаков — уменьшение относительной площади сосудов, уменьшение запасяющей ткани, наличие гомогенно-палисадных лучей, — которые нельзя связывать с общим угнетением растений, следует рассматривать как комплекс новых признаков, выработавшихся в эволюции и прямо или коррелятивно связанных с требованиями местобитания.



а



б

Рис. 4. Схемы лучей на радиальных срезах.

а — ива арктическая; б — ива белая.

ЛИТЕРАТУРА

- Лебеде́нко Л. А. Онтогенез древесины корней и ствола некоторых представителей порядка букоцветных. Кандидатская диссертация. Инст. леса АН СССР, 1955.
- Яценко-Хмелевский А. А. Принципы систематики древесины. Тр. Бот. инст. АН Арм. ССР, т. V, 1948.
- Вews T. W. Studies in the ecological evolution of the angiosperms. *New Phyt.*, v. 26, 1927.
- Forsai th C. C. Anatomical reduction in some alpina plants. *Ecology*, v. 1, 1920.
- Kihlmann O. Pflanzenbiologische Studien aus Russisch-Lappland. Helsingfors, 1890.
- Molski B. i. W. Zelawski. Wstepne badania anatomiczne procesu kształtowania się drewna późnego w «sloju rocznym» siewek modrzewia (*Larix europaea* D. C.) w zwiazku z warunkami długości oświetlenia dziennego. *Acta Societatis botanicorum poloniae*, v. 27, № 1, 1958.
- Webber J. E. The woods of sclerophyllous and desert shrubs of California. *Am. J. Bot.*, v. 23, 1936.

ДРЕВЕСИНА В ХОЗЯЙСТВЕ И БЫТЕ ДРЕВНЕГО НОВГОРОДА

В. Е. ВИХРОВ и Б. А. КОЛЧИН

Основным поделочным материалом древней Руси было дерево. Жилища и городские укрепления, мастерские и другие хозяйственные постройки, корабли и сани, мостовые и водопроводы, машины и станки, многие орудия труда и некоторые инструменты, посуда и мебель, домашняя утварь и детские игрушки — все делалось из древесины. Особенно широкого распространения и высокого мастерства деревообрабатывающие ремесла достигли в центральных и северных районах Руси, богатых хвойными и лиственными лесами.

До последних лет эта отрасль древнерусской промышленности оставалась неизученной в связи с тем, что среди археологических материалов находки из дерева, как правило, отсутствовали. В культурном слое органические остатки, в том числе и древесина, в большинстве случаев не сохраняются. Исключение составили некоторые русские города: Новгород, Москва, Белоозеро, Ладога, Смоленск, — в культурном слое почв которых древесина с разной степенью сохранности доходит до нас вместе с иными находками. Лучше всего сохранилась древесина в земле Новгорода. Раскопки последних лет в Новгороде дали огромную коллекцию находок из дерева, исчисляемую десятками тысяч экземпляров.

Большое историко-культурное значение представляет изучение состава древесины по породам, имевшим в древней Руси промышленное и бытовое применение. Для определения видов древесины более 900 находок из новгородской коллекции были подвергнуты диагностическому анализу. Все определения велись по микроскопическим признакам древесины под микроскопом. Следует сказать, что диагностика в ряде случаев была затруднена, так как древесина некоторых изделий была значительно разрушена. Определение древесины, как это принято при микроскопических анализах, велось до рода.

Микроскопические срезы готовились от руки, при этом образцы особой обработке не подвергались, а микропрепараты не окрашивались. Результаты наших диагностических анализов приведены в таблице.

Оказалось, что для изготовления всевозможных предметов, машин и приспособлений, для возведения построек, сооружений и многого другого новгородцы применяли древесину 27 пород. Из них 19 пород: сосна, ель, можжевельник, дуб, ясень, клен, береза, липа, ольха, ива, осина, вяз, ильм, лещина, рябина, яблоня, груша, черемуха и бересклет — были местными, из лесов центральных и северных районов Руси и 8 пород: лиственница, пихта, кедр, самшит, тис, каштан, бук и грецкий орех — привезенными с юга, востока или запада.

Как мы видим, разнообразие пород довольно велико. Древесина этих пород по своим техническим свойствам весьма различна. Наряду с так называемыми мягкими породами использовались породы, древесина которых обладает большой прочностью и значительной твердостью. Широко использовалась древесина, обладающая высокими декоративными свойствами.

Результаты диагностического анализа деревянных изделий древнего Новгорода

№ п. л.	Категория изделий	Количество анализов	Деревянные изделия																										
			Сосна	Ель	Лиственница	Можжевельник	Тис	Пихта	Кедр	Самшит	Дуб	Ясень	Клен	Береза	Липа	Ольха	Ива	Осина	Вяз	Ильм	Лещина	Рябина	Яблоня	Груша	Черемуха	Бересклет	Каштан	Бук	Грецкий орех
1	Постройки жилые и служебные	8	4	3						1																			
2	Карнизы, курицы и подобные детали	7	3	2	1					1																			
3	Мостовые	2	1	1																									
4	Водопроводы	2	2																										
5	Детали разных машин и приспособлений	58	22	9		9			2		12	1	3																
6	Подшипники упорные	9							1		2		1	4		1													
7	Весла	12	7	1	1								2		1														
8	Уключины от лодок	6	2	1	1					1						1													
9	Шпангоуты кораблей и лодок	8	1	4	3																								
10	Детали саней	6			1					5																			
11	Сосуды точеные	139	5			2					44	45	8	2	25		3			3	1	1							
12	Сосуды резные и долбленые	49	4	7						1	1	12	8	4	3	1	1		2	3	1								
13	Ложки	129	7			9			1	1	4	84	9		1	2				3	3		2	1		1			1
14	Ковши резные	46	3	4						3	4	15	9	1	2	2			2	1									
15	Ведро, кадушки, ушаты	54	35	9	3		3	1	1				1	1															
16	Бочки	7								7																			
17	Обручи от бондарных изделий	6		6																									
18	Лопаты	21	12	6						3																			
19	Сапожные колодки	6	2										3					1											
20	Орнаментированное дерево	27	4	4	1								3	3	14							1							
21	Посохи, жезлы	6			2								3								1								
22	Разные навершия, шары	14	1	2						3			2		2		1				1		1			1			
23	Гребни	85	1										1			1													
24	Коробочки точеные	1									1																		
25	Мутовки	10		10																									
26	Рукоятки ножей	6	2	1				1				1								1									
27	Игрушки детские	12	2		1						1	1		4					1				3						
28	Волчки	10	6							2			1	1															
29	Разные изделия и неопределенные предметы	163	46	21	14	4		3	1		15	7	11	13		6	4	2	7		2	2	1	2			1	1	
	Всего	909	172	91	25	27	3	9	3	83	56	62	177	66	24	40	12	7	9	4	10	9	6	7	2	1	2	1	1

Самыми распространенными видами деловой древесины были сосна и ель. Из древесины этих пород строили жилища, городские укрепления, мостовые улиц, водопроводы, корабли, изготовляли станки, бондарные изделия, мебель, разные ремесленные приспособления, орудия труда и т. д.

Из этих двух основных хвойных пород значительно чаще применялась древесина сосны. В строительстве жилищ, надворных построек, мостовых, тынов и подобных сооружений сосна и ель применялись сравнительно в одинаковой мере, в прочих же поделках хозяйства и быта новгородцы предпочитали сосну.

Сосна являлась самой массовой породой, обеспечивающей древесиной основные потребности строительства, хозяйства и быта древних новгородцев. Такое широкое использование древесины этой породы объясняется достаточными запасами ее в лесах новгородской земли, легкостью обработки режущими инструментами, небольшой, сравнительно с елью, суковатостью, довольно высокой стойкостью ядра против поражения дереворазрушающими грибами. Древесина сосны отличается достаточно хорошими техническими свойствами: она умеренно легкая, мало усыхающая, мягкая и сравнительно прочная; ядровая древесина обладает малой водопроницаемостью.

Свойство малой водопроницаемости и легкости обработки сосны, а также и ели новгородцы очень хорошо знали и умело использовали. Например, бондарные сосуды: ведра, кадки, лоханки и ушаты, — служившие основной тарой для жидкостей и прежде всего воды, изготовлялись главным образом из сосны и иногда из ели. Так, при определении 54 образцов бондарных изделий указанной группы из сосны оказалось 35 образцов, из ели 9, по 3 из ливенницы и тиса и по одному образцу из пихты, кедра, березы и липы. Итак, 65% бондарных сосудов указанной группы были изготовлены из сосны и 16% из ели.

Следует заметить, что в приведенной нами таблице суммарное количество изделий из сосны, ели, а также и других пород не дает ясного представления об употреблении той или иной древесины для изготовления названных изделий. Образцы для анализа на первой стадии исследования подбирались без определенной системы. Затем, когда наметилась некоторая дифференциация в выборе древесины в зависимости от назначения предмета, на второй стадии исследования были выбраны определенные группы изделий, такие, как точеная посуда, резная посуда, ложки, гребенки и пр. О степени распространенности того или иного вида древесины в жизни новгородцев мы говорим на основании учета всех находок изделий и сооружений из дерева, обнаруженных на Неревском раскопе в Новгороде.

Древесина ели широко применялась наравне с сосной лишь в строительстве. В иных случаях ее использовали реже. Предпочтение ели отдавали лишь при изготовлении некоторых узлов в судостроении, например шпангоутов, в бондарном производстве при изготовлении малообъемной посуды (жбанчики и подобные сосуды) и некоторых хозяйственных поделок.

Ель — спелодревесная порода. Спелая древесина, расположенная в центральной части ствола, по своему цвету не отличается от заболони. Древесина светлого, почти белого цвета, с легким желтоватым оттенком. Объемный вес и прочность ее ниже, чем у сосны. Древесина у ели легкая, умеренно усыхающая, умеренно прочная и мягкая; в ней часто наблюдаются кривизна и эксцентричность годичных слоев, приводящие к неравномерной усушке и короблению материала. Несмотря на то, что древесина ели относится к мягким породам, она режущими инструментами при изготовлении крупных изделий обрабатывается с большим трудом,

чем древесина сосны. Обработке ели препятствуют многочисленные твердые сучки, повышающие сопротивление резанию и мешающие чистоте отделки поверхностей; кроме того, ель легко раскалывается. К достоинствам ели следует отнести однородный, долго сохраняющийся белый цвет древесины, небольшую смолистость, однородность строения, небольшую усушку и очень небольшую водопроницаемость.

Древние новгородцы хорошо знали перечисленные качества древесины ели. Например, обручи на бондарные изделия бондари делали только из ели. Из шести исследованных обручей разного времени все оказались еловыми. Маленькие столовые сосуды (жбанчики) делались также только из ели. Такая универсальная принадлежность хозяйства, как мутовка, делалась только из ели. Изготавливались из нее и большие резные ковши и черпаки.

Из местных хвойных пород новгородцы использовали и древесину можжевельника.¹ Среди исследованных нами находок из можжевельника всего встречено 27 предметов. Очень интересен факт ограничения областей применения древесины можжевельника. Из этой древесины новгородцы изготавливали ответственные детали машин (9 предметов, такие, как вертлюги, блоки, собачки от ткацких станков и т. п.), а также ложки (9 находок) и маленькие точеные сосуды (2 предмета), посохи и жезлы.

По своим физико-механическим свойствам древесина можжевельника обыкновенного является умеренно тяжелой, очень мало и равномерно усыхающей, умеренно прочной и мягкой. Особым достоинством древесины служит ее небольшая равномерная усушка и слабое разбухание. В результате этого изделия из можжевельника при высыхании не растрескиваются и не коробятся. Даже предметы, найденные при раскопках, несмотря на длительное пребывание их во влажной почве и некоторое разрушение клеточных стенок древесины, при высыхании в отличие от изделий других пород прекрасно сохраняют свою форму и не покрываются трещинами. Малая усушка древесины и стабильность размеров изделий при перемене влажности, по-видимому, и служили одной из главных причин применения ее для ложек и деталей механизмов. Другим положительным свойством древесины можжевельника является ее высокая декоративность — желтовато-бурый цвет и довольно красивая текстура, слагающаяся из белых и темных волнистых линий и полос ранней и поздней зоны годичных слоев.

Древесину лиственных пород новгородцы применяли главным образом для изготовления бытовых вещей и некоторых машин и приспособлений. Очень редко дуб, береза и осина употреблялись для жилых построек, использование их в строительстве было весьма ограниченным. Из дуба изготавливались детали, украшающие жилые постройки. Например, резные массивные колонны, покрытые тонкой высокохудожественной резьбой, а также карнизы, причелины и т. п.

Применение древесины лиственных пород только для бытовых изделий и лишь некоторых производственных приспособлений объясняется тем, что древесина березы, клена, липы и осины обладает небольшой стойкостью против грибных повреждений и на открытом воздухе во влажном климате Новгорода быстро разрушалась. Это отрицательное свойство было хорошо известно новгородцам, и они предпочитали строить свои жилища и другие

¹ Древесина можжевельника по микроскопическим признакам весьма незначительно отличается от древесины кипариса. Диагностика этих пород крайне затруднена. Поэтому не исключено, что некоторые из изделий изготовлены не из местной породы можжевельника, а из привозного кипариса. Из кипариса широко изготавливали предметы культа.

сооружения из более стойкой древесины — хвойных. Что же касается стойкой и прочной древесины дуба, то применение его для строительства ограничивалось сравнительно небольшими запасами его в лесах Новгорода. Древесина дуба была дефицитной и употреблялась для изделий, которые должны были обладать повышенной прочностью.

И все же из лиственных пород наиболее широко применялся дуб. По широте распространения для бытовых и хозяйственных изделий древесина дуба занимает третье место, уступая лишь древесине сосны и ели. Древесина дуба высоко ценилась за свои хорошие технические свойства. Она умеренно тяжелая, прочная и твердая, обладает значительной стойкостью против грибных поражений, хорошо поддается гнущю. Темный коричневый цвет древесины ядра, крупные сосуды, широкие сердцевинные лучи придают ей высокие декоративные свойства. Особенно красива текстура на радиальных поверхностях изделий.

Как видно из приведенной нами таблицы, древесина дуба по видам применения имела довольно широкие рамки. Помимо применения в строительстве, она использовалась для изготовления различных деталей механизмов и приспособлений: лодочных уключин, оглобель, лопат, посохов, игрушек, больших резных ковшей, черпаков и ряда других деталей. Перечисленные изделия новгородцы выделывали и из других пород. Но были два разряда поделок, которые изготовляли только из дуба — это полозы саней и 10-ведерные бочки (объемом около 120 л).

Основным средством сухопутного транспорта новгородцев были сани, разных видов и размеров. У новгородцев в X—XV вв. было шесть основных типов саней: грузовые сани обычные (розвальни), грузовые тяжеловозные, легковые пассажирские, легковые с высокой грядкой (беговые), сани-возки с кузовом и ручные салазки. Полозы у этих саней всегда делались из дуба. Кроме диагностического определения под микроскопом (из 5 полозов 5 были из дуба), более 65 полозов были определены по макроструктуре. Все они оказались также из дуба. Другие детали саней (копылы, грядки и прочее) делались иногда из дуба, но чаще из других пород.

Малая водопроницаемость ядра древесины дуба и высокая прочность и стойкость ее определили выбор этой породы и для изготовления больших тонкостенных бочек.

Эти бочки имели головной диаметр в пределах 45 см и высоту в 76 см. Толщина клепки не превышала 0.8 см. Это намного меньше толщины сосновой клепки обычных кадок или ушатов, не говоря о больших толстостенных сосновых бочках.

Следующей лиственной породой, имевшей широкое применение по видам изделий, была древесина березы. Она использовалась разнообразно, что объясняется не только значительным распространением березы в лесах новгородской земли, но также и сравнительно высокими физико-механическими свойствами ее древесины.

Береза — заболонная порода. Ее белая с желтоватым или слегка красноватым оттенком однородная по строению и окраске древесина обладает хорошими физико-механическими свойствами. Она умеренно тяжелая, сильно усыхающая, умеренно прочная и посредственно мягкая. Древесина березы легко обрабатывается режущими инструментами и хорошо полируется. Прочность и большая однородность строения позволяет наносить на древесине тонкую художественную резьбу.

Древесина березы применялась для выработки упорных подшипников, рабочее гнездо которых изготовлялось всегда в месте нахождения сучка, всевозможных художественных поделок, детских игрушек, разных рукоятей, боевых луков. Иногда береза шла для изготовления ложек, точеных и

резных сосудов. Как и в настоящее время, из древесины березы в Новгороде делались сапожные колодки.

Значительное место в быте древних новгородцев занимали изделия из клена и ясеня. Запасы остролистного клена и ясеня в лесах новгородской земли были невелики, и новгородцы, правильно оценивая высокие физико-механические и декоративные свойства этой древесины, применяли ее в основном для изготовления столовой посуды и ложек. Из клена делали точеные и резные сосуды разных форм и размеров, ложки, разные ковши и черпаки. Из ясеня изготовляли только токарную посуду.

Остролистный клен представляет собой крупное дерево, достигающее в благоприятных условиях роста 30 м в высоту и свыше 1 м в диаметре. Весьма однородная по своему строению, рассеянно-сосудистая древесина клена имеет белый цвет с ясно выраженным красноватым или желтоватым оттенком и характерный шелковистый блеск. Блеск придают ей неширокие, но хорошо заметные на всех разрезах более темные, чем общий фон древесины, блестящие сердцевинные лучи. Годичные слои заметны на всех разрезах в виде темных или светлых полосок. Блестящие сердцевинные лучи, годичные слои, разделенные темной или светлой, тоже блестящей, тонкой полоской, создают характерную, довольно красивую текстуру. Особенно хорошая текстура возникает при свилеватом расположении волокон.

Древесина клена отличается высокими физико-механическими свойствами. Она тяжелая, умеренно усыхающая, прочная, твердая. Механические свойства ее выше, чем древесины дуба. Древесина клена отличается также и хорошими технологическими свойствами. Она хорошо обрабатывается режущими инструментами, давая гладкую поверхность, прекрасно полируется, приобретает глянецвитость, незначительно коробится, долго не выцветает, сохраняя первоначальный цвет древесины, и с большим трудом раскалывается.

Ясень, как и клен, — крупное многолетнее дерево. Широкая белая с желтоватым оттенком заболонь нерезко ограничена от более темного, неравномерно окрашенного, светло-бурого, иногда с зеленоватым оттенком, ядра. Годичные слои хорошо заметны на всех разрезах. Многочисленные, узкие, невидимые простым глазом сердцевинные лучи придают древесине характерный шелковистый блеск. Древесина ясеня обладает высокими декоративными свойствами. Особенно красивая текстура образуется при небольшой свилеватости волокон. В этом случае на продольных разрезах возникают извилистые, с неравномерным блеском, разбегающиеся струйчатые полоски.

Древесина ясеня отличается высокой прочностью, твердостью, большой вязкостью. Она обладает небольшой истираемостью, малой склонностью к растрескиванию и очень малой водопроницаемостью и ядра, и заболони, прекрасно полируется, не дает отщепов.

Все положительные свойства ясеня: высокая прочность, небольшая раскалываемость и малая водопроницаемость, позволявшие вытачивать деревянную посуду больших диаметров с тонкими стенками, хорошая полируемость, дающая возможность тщательно отделывать поверхности изделий, малая истираемость, сохраняющая при эксплуатации посуды гладкость стенок и, наконец, высокая декоративность, придающая посуде большую художественность, — были учтены и использованы новгородскими токарями уже в X в.

Рассматривая применение древесины по видам изделий, следует обратить внимание на высокую профессиональную культуру новгородских ремесленников, хорошо знавших материал и владевших высокой техникой его обработки.

Для изготовления ложек новгородские ложкари начиная с X в. употребляли в основном древесину клена. Из 109 исследованных ложек 84 (65%) оказались кленовыми. Из других пород — березы (9 штук), можжевельника (9 штук) и сосны (7 штук) — были сделаны ложки и половники специальных форм и назначения.

Точеная посуда изготовлялась из клена, ясеня и ольхи. Из 139 исследованных точеных сосудов 45 (33%) оказались из клена, 44 (32%) из ясеня,

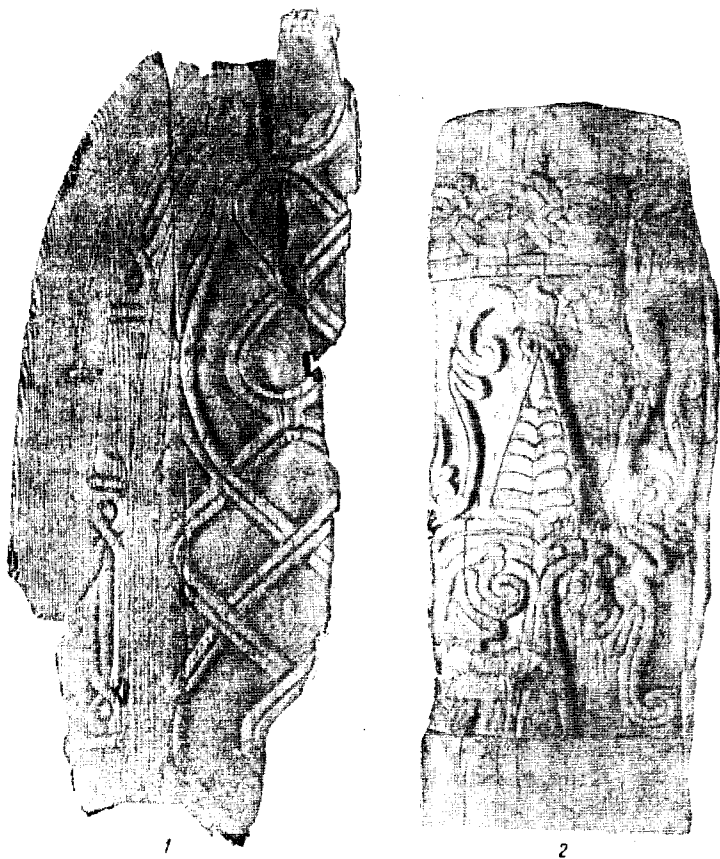


Рис. 1. Художественные изделия.

1 — резная спинка скамьи, липа, XIII в.; 2 — резная колонна, дуб, XI в.

25 (18%) из ольхи, 8 (6%) из березы и единичные экземпляры из других пород. Следует заметить, что из ольхи изготовлялись маленькие точеные коробочки.

Деревянная точеная посуда в Новгороде получила широкое распространение в быту уже в X в. На токарных станках, кстати сказать, сделанных тоже из дерева, изготовлялось несколько видов посуды, в основном столовой. Кроме посуды, на станке делали коробочки, балясины, шахматы, шашки, веретена и ряд других предметов. В Новгороде в быту рядовых горожан применялись более 15 видов точеной посуды: чашки, чаши, мисы, блюда, кубки, сосуды на стоянках, чаши фигурные, чарки и др. (рис. 1—4). Техника токарного ремесла стояла на высоком уровне.

При изготовлении точеной посуды новгородские токари применяли два способа использования ствола дерева — в поперечном и продольном (тангенциально-радиальном) направлениях.

Основной способ был так называемый пластинный, когда углубление в сосуде делали с боковой стороны ствола, т. е. на радиальном или тангенциальном разрезе дерева. Поэтому направление волокон древесины преимущественно было перпендикулярным к плоскости стенок сосуда, что

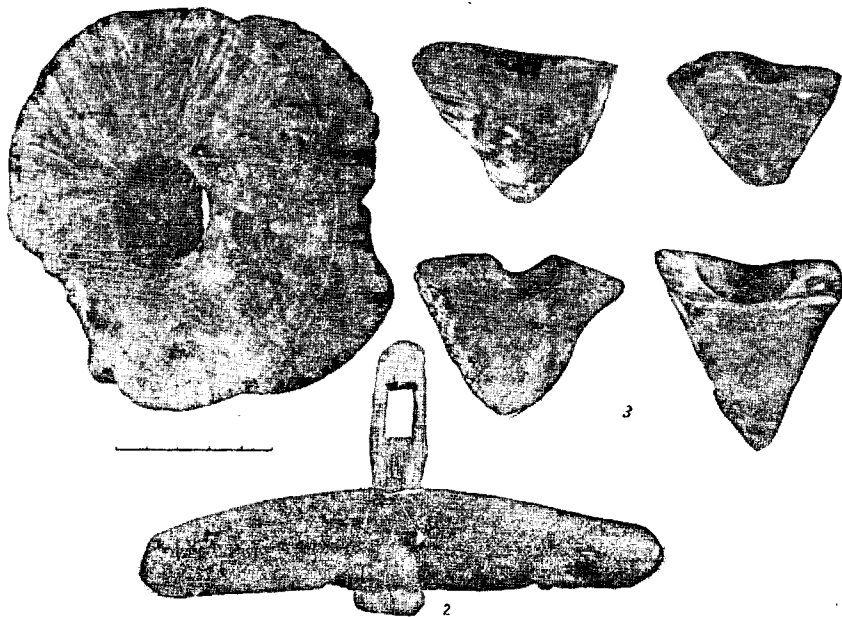


Рис. 2. Детали машин.

1 — блок, XIV в., кап березовый; 2 — вертлюг, сосна, XII в.; 3 — вкладыши опорных подшипников XI—XIII вв.

придавало изделию высокую декоративность. Таким способом было изготовлено около 95% всей точеной посуды, собранной на раскопках в Новгороде.

Второй способ, так называемый стоечный, заключался в том, что углубление в сосуде делали с торцевой части ствола дерева таким образом, что направление древесных волокон более или менее совпадало с боковыми стенками сосуда.

Итак, основным приемом изготовления посуды являлся так называемый пластинный способ.

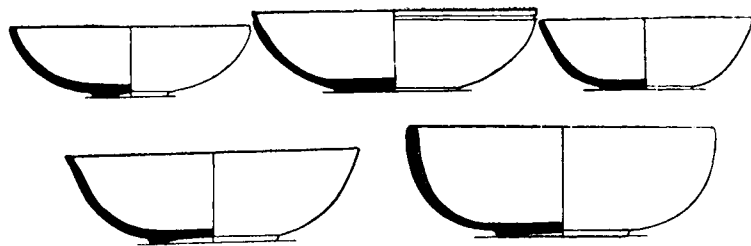
Для технологического процесса изготовления точеных сосудов, как пластинных, так и стоечных, были необходимы следующие приспособления и инструмент: токарный станок с принадлежностями, топор, тесло, ножи, пила, набор токарных резцов, клинья, чекмари, киянки.

Более сложная технология была у сосудов, изготавливаемых так называемым пластинным способом.

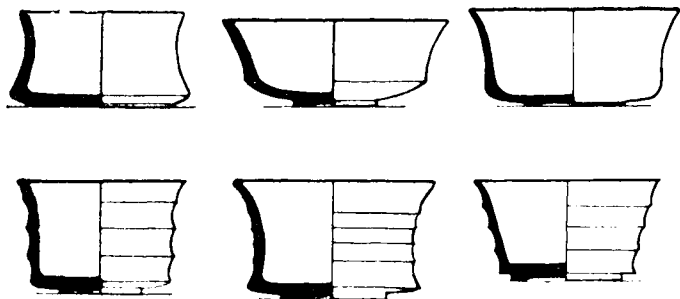
Для характеристики реконструкции технологического процесса мы располагаем вполне достаточным рядом технических данных, полученных из анализа самих изделий — сосудов разнообразных форм, и археологическими находками, собранными на территории раскопанных токарных мастерских, в виде отходов производства и разных приспособлений.



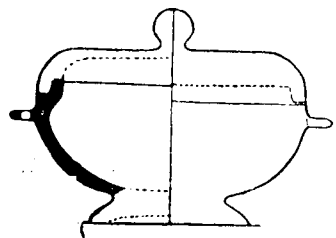
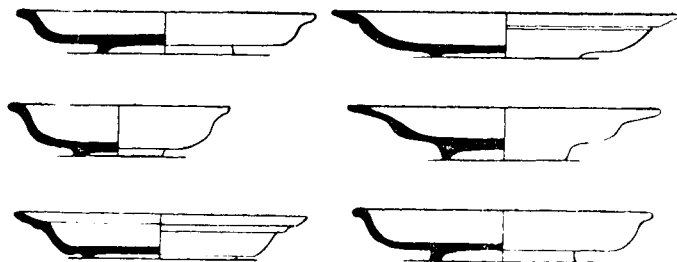
1



2



3



5

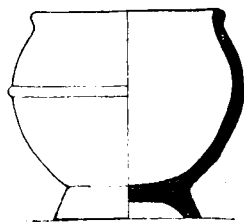


Рис. 3. Точеная посуда X—XIV вв.

1 — мисы; 2 — чаши; 3 — ставцы; 4 — блюда; 5 — столовые мисы; 6 — чаши на столбах.

Микроструктурное исследование поверхности большого количества сосудов показало, что резцом на токарном станке были выточены только стенки сосуда и частично его днище и поддон или нижний рельеф. Центральная часть дна сосуда и его нижняя поверхность в области поддона сделаны вручную. Это говорит о том, что сосуд был закончен точением и снят с токарного станка, когда у него центральная часть дна сосуда и нижнее его дно еще не были обработаны и имели конусовидные выпуклые «приливы». Эти «приливы» на сосуде в дальнейшем снимались вручную.

Конусовидные «приливы» являются остатками центровых цилиндров, на которых держался сосуд в бабках токарного станка. Они свидетельствуют о том, что сосуд на станке был выточен за одну установку без каких-либо перемещений на трезубце шпинделя и на задней бабке.

Для понимания процесса реконструкции технологии очень важны находки донных и внутренних бабышек, являющихся остатками центровых цилиндров, на которых был закреплен сосуд в токарном станке. Эти отходы токарного производства в Новгороде встречены в разных хронологических слоях. Бабышки представлены двумя типами. Один тип имеет форму конуса с плавными стенками, на которых сохранились следы черновой обработки круглым токарным резцом. На плоском основании конуса также всегда имеются следы от металлического трезубца, на который насаживалась баклуша изготавливаемого сосуда.

Второй тип бабышек имел форму удлиненного цилиндра, оканчивающегося с одной стороны плоским дном, с другой — конусом. На стенках цилиндра и конуса имеются следы круглого токарного резца. На плоском донце цилиндра всегда расположен конусовидный выем диаметром от 10 до 15 см. В этот выем входил центр задней бабки при закреплении заготовки сосуда на токарном станке.

Заготовка пластинного сосуда представляла собой баклушу, изготовленную из кряжа ствола дерева. Кряж ствола рубили или распиливали на части, высотой, равной диаметру будущего изделия, с небольшим припуском на обработку. Затем эти кряжи раскалывали на половины, из которых каждая потом отесывалась топором с выпуклой стороны до формы сплюснутого или вытянутого полушара, в зависимости от вида и размеров изготавливаемого сосуда.

После этого баклушу устанавливали на токарный станок. Выпуклой сферической или конусообразной стороной баклушу крепили неподвижно на трезубец шпинделя станка, а к противоположной плоской части баклуши к центру ее вращения подвели опорный конус задней бабки. Для этого в указанном месте у баклуши делали конусовидный выем.

Точение сосуда начинали с наружной стороны баклуши. После черновой зачистки поверхности, т. е. удаления следов обработки баклуши топором, вытачивали наружную стенку сосуда. Оставив с наружной стороны цилиндр крепления, начинали вытачивать внутреннюю полость сосуда. Здесь точение доводили также только до внутреннего цилиндра крепления. После чистовой обработки наружной и внутренней поверхностей сосуда подрезали цилиндры крепления и сосуд снимали. Оставшиеся «приливы», как мы говорили, срезали вручную резцом или ножом. Выточенные чаши оставляли чаще всего без каких-либо покрытий, так как естественный цвет и текстура ясеня и клена были достаточно красивы.

Описаний и изображений русских токарных станков X—XVI вв. не сохранилось. Представить конструкцию и устройство токарного станка мы можем лишь на основе археологического материала.

Прежде чем перейти к анализу конструкции токарного станка, мы напомним его кинематическую схему. Основным является условие, чтобы

обтачиваемый предмет вращался вокруг оси точения, не менял положения и был прочно закреплен. Наиболее универсальным решением этого условия являлось закрепление изделия в прямых неподвижных центрах, проходящих по оси вращения предмета. Круговое движение передавалось непосредственно на предмет, как правило, гибким приводом. Нажимая стальным резцом на поверхность предмета, с вращающегося изделия снимали стружку.

Практическое выполнение этой схемы довольно просто, если обтачиваемый предмет представляет удлиненный цилиндр того или иного размера и обрабатывается только его поверхность.

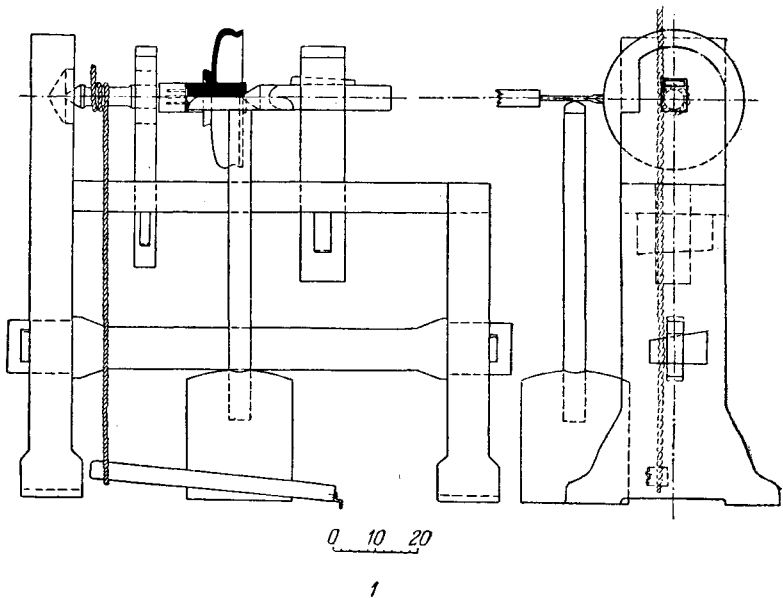


Рис. 4. Токарное дело.
1 — схема токарного станка;

Значительно усложняется технологическое выполнение этой схемы, если обрабатываемый предмет не имеет формы удлиненного цилиндра. Тогда необходимо вводить ряд промежуточных приспособлений, которые получали бы движение и передавали его на обрабатываемое изделие.

Как мы уже говорили, основной способ, которым изготовляли в древней Руси деревянную посуду, был так называемый пластинчатый. У чаши, выделываемой этим способом, ось вращения не совпадала с направлением волокон древесины, т. е. длина болванки заготовки шла не вдоль, а поперек ствола дерева. Следовательно, радиальный или тангенциальный скол от ствола дерева нужно было как-то дополнительно крепить на токарном станке.

Мы видим, что в токарном станке имелось специальное устройство — шпиндель, для крепления обтачиваемого предмета. Без такого приспособления пластинчатые точеные чаши, достигавшие диаметра в 500 мм, сделать было нельзя.

Круговое вращение шпиндель получал через лучковую передачу. Устройство этого привода заключалось в следующем. Веревка, обвитая двумя-тремя витками кругом стержня шпинделя, одним концом прикреплена

лялась к ножной педали, которая давала ей рабочий ход, а другим — к пружинящему приспособлению, возвращающему веревку в первоначальное положение. Этот универсальный преобразователь возвратно-

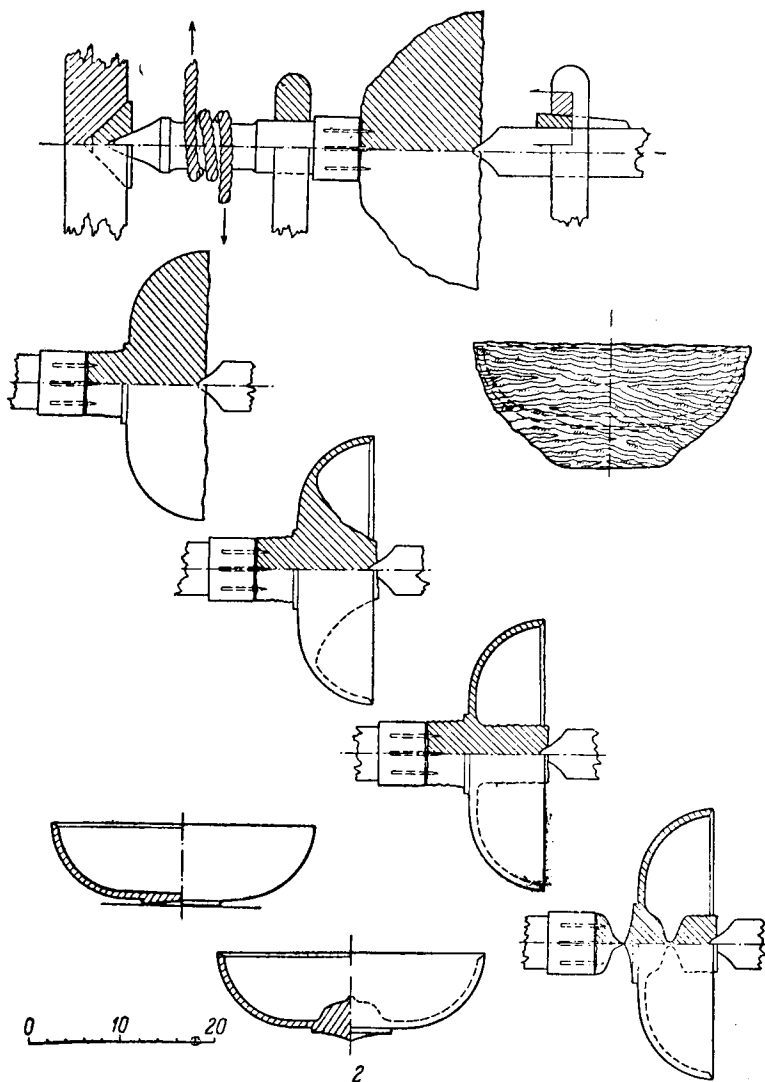


Рис. 4 (продолжение)

2 — технологическая схема изготовления точеного сосуда.

поступательного движения в возвратно-круговое, изобретенный человеком еще в глубокой древности, обладал исключительной жизнеспособностью. Он дожил до нашего времени. До XVIII в. он был единственным.

В средневековых источниках уже Теофил описывает подобные устройства, приводящие в движение болванки давяльных станков. На западноевропейских гравюрах и миниатюрах XIV—XVI вв., изображающих токарные станки, везде представлены только лучковые передачи. И, наконец, в русской кустарной промышленности широко применялся лучковый привод вплоть до XX в.

Кроме шпинделя, в станке еще необходима задняя бабка, служащая вторым опорным центром. Обязательным узлом станка является опора (поддержка) для резца. Известно несколько систем таких опор: от простых стоек, подставляемых к станку, до подручников, укрепляемых на раме станка. Станина, на которой укрепляются все узлы и детали станка, должна быть прочной и массивной.

Последнее условие, которое необходимо учесть при анализе работы токарного станка, — это чистота поверхности точеной посуды. Как мы уже говорили, наружная и внутренняя поверхности посуды всегда были чистыми и гладкими. Этого можно было достигнуть только при условии достаточных скоростей резания. При слишком замедленном резании поверхности получают рваными, с махрами и задиринами.

Итак, конструкция древнерусского токарного станка удовлетворяла следующим техническим условиям: а) наличие шпинделя; б) надежность крепления изделия на шпинделе; в) достаточная мощность привода; г) прочность и массивность конструкции; д) большой ход приводной веревки; е) оптимальные скорости резания.

Исходя из этих технических условий и учитывая конструкции археологически известных деталей и узлов механизмов, реконструируется токарный станок, применявшийся в древней Руси в XIII—XIV вв. При реконструкции для решения того или иного условия берутся самые упрощенные варианты.

Основа станка — мощная станина состояла из двух массивных стоек, сделанных из широких и толстых тесин. На высоте около 70 см между этими стойками проходили два поперечных бруса, образуя стол станка. Между брусами был промежуточный паз, в котором закреплялась передняя стойка шпинделя и задняя бабка. Стойка шпинделя и задняя бабка закреплялись на столе шиповым хвостом с клиновым запором. Шпиндель представлял собой круглый стержень диаметром в 50 мм. Один конец шпинделя был с коническим срезом, на другом имелась головка, в которую неподвижно были вставлены железные острия, образующие трехзубец головки шпинделя. Проходя через подшипник передней стойки, шпиндель упирался своим коническим концом в упорный подшипник станины. В задней бабке на уровне шпинделя делалось квадратное отверстие, в которое вставляли брус заднего центра. В неподвижном состоянии брус закреплялся клиновым запором. Конец бруса имел острие, которым крепился обрабатываемый предмет.

Трансмиссией шпинделя являлась лучковая передача. Приводная веревка шла от пружинящего потолочного приспособления к ножной педали. Поддержкой резца служила специальная стойка, или брус, лежащий на передней или задней бабке.

На остальных породах древесины, произраставших в лесах новгородской земли (ива, осина, вяз, ильм, лещина, рябина, яблоня, груша, черемуха и бересклет), мы останавливаться не будем, так как они не имели широкого применения в быту и промышленности древнего Новгорода. Скажем лишь, что древесину этих пород новгородцы иногда применяли для выработки домашнего утвари, посуды и ложек.

Среди деревянных изделий Неревского раскопа встречены предметы, сделанные из древесины пород, которые не произрастали в лесах новгородской земли. Среди них обнаружена древесина лиственницы, пихты, кедра, самшита, тиса, каштана, бука и грецкого ореха.

Большой интерес представляет использование в Новгороде самшита. Его древесина применялась исключительно для изготовления гребней. Из 85 исследованных гребней 82 были сделаны из самшита и по одному

из сосны, березы и ивы. Самшит, произраставший в лесах Талыша, северного склона Кавказа и на черноморском побережье Кавказа, в Новгород поступал в X, XI, XIII, XIV и XV вв. волжским путем. В XII в. этот путь был закрыт половцами, и новгородские гребенщики остались без сырья. В это время гребни изготовлялись только костяные. В XIII в. восточная торговля восстановилась, и самшит вновь стал поступать в Новгород. Кроме гребней, в Новгороде найдено еще одно изделие из самшита. Это маленькая круглая точеная коробочка, у которой еще окончательно не выточена внутренняя полость. Это был еще полуфабрикат коробки, потерянный или выброшенный новгородским токарем XIII в.

Из древесины тиса встречены три предмета. Все они оказались маленькими клепками от небольших столовых бондарных сосудов — жбанчиков. Датируются они все XI в.

Если для изготовления гребней в Новгород привозили древесину самшита, то едва ли для выработки столовых жбанчиков (они чаще всего изготовлялись из ели) специально доставляли древесину тиса. Скорее всего предположить, что тис был привезен в Новгород в XI в. в виде уже какой-то готовой поделки, вероятно бочки или подобного изделия. И уже потом, разобрав бочку, новгородский бондарь использовал дорогую и красивую древесину тиса для изготовления столового сосуда. Тисовая бочка могла попасть в Новгород или с берегов южной Балтики, или из лесов Кавказа.

Из привозной древесины мы упоминали еще лиственницу. Всего из числа исследованных образцов из лиственницы обнаружено 25 изделий: среди них шпангоуты кораблей, весла, уключины, детали саней, кадушки и ряд других изделий. Самым ближайшим к Новгороду местом произрастания лиственницы является район, расположенный к востоку от Ладожского озера, а также леса Камского бассейна.

Как и древесина тиса, древесина лиственницы в Новгород поступала вероятнее всего теми или иными поделками и главным образом в виде корабельных снастей, а иногда и самих кораблей.

В заключение нашего очень краткого обзора мы приведем новгородский древообрабатывающий инструментарий X—XV вв. Он представлен всеми видами режущего и рубящего инструмента. Для плотников, столяров, токарей и других ремесленников по дереву новгородские кузнецы изготовляли высококачественные стальные инструменты. Это были топоры, тесла, пилы, скобели, долота, сверла, наструги (инструмент типа рубанка), стамески, бондарные скобельки, уторные пилки, резцы токарные, ручные, для художественной резьбы, ножи, гвоздодеры и т. д. Кроме того, в инструментарии были деревянные киянки, чекмари и ряд деревянных приспособлений.

Топоры изготовлялись с легким симметричным лезвием и с наварным стальным острием. Стальные наварные лезвия термически обрабатывались — закаливались. Деревянные рукоятки топоров в отличие от современных были прямыми и довольно длинными. Подчеркнем, что топоры с прямыми рукоятками имели очень большой коэффициент полезного действия. Он колебался в пределах 0.8—0.973.

Тесла выделялись двух типов. Большие проушные для плотницких, корабельных и подобных работ и малые втульчатые с коленчатой рукояткой, которые применяли ремесленники по изготовлению ложек, резной и долбленой посуды и подобных предметов.

Пилы по дереву в древней Руси были хорошо известны и широко применялись плотниками и столярами. Пилы в Новгороде археологически

известны уже в X в. Их было два типа: пилы-ножовки для поперечного и лучковые для продольного пиления. Полотна пил-ножовок достигали длины до 450 мм. Деревянная рукоятка насаживалась на черенок, являвшийся прямым продолжением полотна (как у ножа). Зубья имели треугольную форму и всегда разводились. Заточка режущей кромки зубьев производилась так же, как и в настоящее время. Иногда зубья делались двухвершинные. Например, на целой пиле XIII в., найденной в Новгороде, 44 зуба имели по две вершины. У каждого крупного зуба треугольной формы на острие делался дополнительный треугольный выпил, образующий на зубе две вершинки (всего, следовательно, было 88 зубьев). Шаг зуба равнялся 10 мм. Пилы делались из стали и обрабатывались термически — закаливались с последующим высоким отпуском.

Лучковые пилы для продольного пиления также имели длинные полотна: до 500—600 мм. Профиль полотна и строение зуба лучковых пил были иными, чем у пил-ножовок. Зубья по форме походили на зубья современных продольных пил, т. е. были односторонними и плоскими. В Новгороде в слоях начала XIV в. было найдено полотно лучковой пилы. Ширина полотна 22 мм, зубья односторонние высотой 2.2 мм и шагом 8.5 мм. Пила была цельно стальная.

Долота делались цельнометаллическими со стальными наварными лезвиями. Ширина лезвий колебалась от узких, 6 мм, до широких, 22 мм. Долота выпускались массивными и имели наиболее целесообразную конструкцию лезвия и обуха.

Сверла по дереву изготовлялись двух систем: перовидные и спиральные. Те и другие делались разных размеров. Диаметр их колебался от 4 до 20 мм. Режущие грани были всегда стальными.

Скобели изготовлялись нескольких типов: большие и малые, а также с прямым и дугообразным лезвием. Тонкие стальные лезвия имели очень маленький угол резания (15—18°), что обеспечивало им при надлежащей заточке большую остроту. Наструги представляли собой те же маленькие скобели с прямым лезвием, но вставленные в деревянную колодку. Таким инструментом было легче строгать и, главное, можно было всегда брать стружку заданной толщины (регулируя железку).

Резцы токарные археологически известны двух типов. Это резцы с крючковидными лезвиями для внутренних выемок в вытачиваемых предметах (например, в посуде) и резцы с прямолинейным лезвием для наружной обточки. Те и другие делались со стальными лезвиями.

Технический анализ многочисленных изделий из дерева, а также деревянных построек и сооружений позволил выявить множество технологических операций и приемов обработки древесины в древней Руси. В основе разнообразной и сложной технологии обработки древесины лежали следующие операции: рубка, теска, раскалывание, долбление, сверление, пиление (распиливание), строгание, точение (на токарном станке) и художественная резьба.

Массовое определение древесины изделий из археологической коллекции древнего Новгорода позволило произвести сопоставления физико-механических свойств, технических особенностей и декоративных достоинств древесины разных пород с техническим назначением и условием эксплуатации изделий. Эти сопоставления показали, что ремесленники древнего Новгорода уже в X в. и в последующее время были прекрасно осведомлены о технических и иных достоинствах и недостатках древесины пород, входящих в состав новгородских лесов, и некоторых привозных. Соответственно этим представлениям о качестве древесины они умело использовали древесину каждой породы наилучшим способом.

Массовой, основной деловой древесиной как в строительстве, так и в изготовлении мебели, судов, машин, многочисленных хозяйственных инвентарей и многого другого были сосна и ель. Из лиственных пород для предметов хозяйственного и бытового назначения широко применялись дуб, береза, клен, ясень, ольха и осина. Из привозных пород в течение многих веков традиционное применение имела древесина самшита.

Новгородские специализированные ремесленники по обработке дерева предстают перед нами как мастера, виртуозно владевшие всевозможными профессиональными техническими навыками и высоким художественным вкусом.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- В и х р о в В. Е. Использование древесины в древнем Новгороде. Тр. Инст. леса АН СССР, т. XXXVII, 1958.
В и х р о в В. Е. и Б. А. К о л ч и н. Из истории торговли древнего Новгорода. Сов. археол., т. 24, 1955.
-

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
Предисловие	3
В. Е. Москалева. Определение по продольным срезам древесины хвойных пород, произрастающих в СССР	5
В. Е. Москалева. Строение клеточной стенки древесины	12
В. Е. Москалева. Изменение строения древесины сосны после длительного пребывания в земле	34
В. А. Баженов. Строение древесины и целлюлозы в свете симметрии их пьезоэлектрических свойств	44
Ю. М. Иванов. К исследованию высокоэластического состояния древесины	64
Ю. М. Иванов. К вопросу застеклования природной целлюлозы в древесине	77
К. С. Александров. Измерение упругих постоянных древесины импульсным ультразвуковым методом	81
Н. Н. Красулин. К вопросу о деформативности древесины сосны при сжатии поперек волокон	86
Ю. М. Иванов. Исследование набухания древесины	91
Ю. М. Иванов. Удлинение и укорочение древесины вдоль волокон при набухании	107
Ю. М. Иванов. О первых работах по определению величины коробления	120
Л. А. Лебедеенко. Сравнительно-анатомический анализ зрелой древесины корней и стволов некоторых древесных растений	124
Л. А. Лебедеенко. К анатомической характеристике арктической ивы (<i>Salix arctica</i> Pall.)	135
В. Е. Вихров и Б. А. Колчин. Древесина в хозяйстве и быте древнего Новгорода	142