

630<sup>x8</sup>  
Д 69

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Дорожко Александр Валентинович

УДК.630.812.76:674.048

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАТУРАЛЬНОЙ  
И МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ РАССЕЙНОСОСУДИСТЫХ  
ПОРОД ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Специальность 05.21.05 - технология и оборудование дерево-  
обрабатывающих производств;  
древесиноведение

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Минск 1986

Работа выполнена в Белорусском ордена Трудового  
Красного Знамени технологическом институте им. С.М.Кирова

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
МАКАРЕВИЧ Сергей Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
УЮЛЕВ Борис Наумович  
кандидат технических наук, доцент  
ХВЕСЬКО Геннадий Михайлович

Ведущее предприятие: Институт механики металлополимерных  
систем АН БССР (г. Гомель)

Защита состоится 2 декабря в 14 час. на заседании  
специализированного Совета К.056.01.01 в Белорусском ордена  
Трудового Красного Знамени технологическом институте  
им. С.М.Кирова по адресу: 220630, г.Минск, ул.Свердлова 13<sup>а</sup>,  
корпус 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорус-  
ского ордена Трудового Красного Знамени технологического ин-  
ститута им. С.М.Кирова

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах с заверенными  
подписями просим высылать по адресу: 220630, г.Минск, ул.Сверд-  
лова, 13<sup>а</sup>, специализированный Совет

Автореферат разослан "       " \_\_\_\_\_ 1986г.

Ученый секретарь  
специализированного Совета

С.П.ТРОФИМОВ

© Белорусский ордена Трудового  
Красного Знамени технологи-  
ческий институт им.С.М.Кирова,  
1986.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важнейших задач, поставленных XXIII съездом КПСС перед лесной и деревообрабатывающей промышленностью страны, является комплексное и рациональное использование лесных ресурсов. В связи с этим особое значение приобретает проблема повышения эксплуатационных свойств малоценной лиственной древесины путём её модифицирования.

Целенаправленное модифицирование древесины невозможно без научно обоснованного прогнозирования свойств получаемого нового материала. Отправной точкой прогнозирования механических характеристик модифицированной древесины являются структурно-механические характеристики натуральной древесины, от достоверности определения которых зависит конечный результат.

Получение достоверных структурно-механических характеристик древесины рассеяннососудистых пород, являющихся основным сырьём для модифицирования, и разработка методики прогнозирования механических свойств модифицированной древесины представляется весьма актуальной задачей.

Цель работы. Целью настоящей работы является разработка структурно-механической модели древесины и на её базе методики прогнозирования упругих характеристик натуральной и модифицированной древесины с различной начальной плотностью и степенью наполнения полимером, проникающим в клеточные стенки, а также экспериментальное определение структурно-механических характеристик натуральной и модифицированной древесины при растяжении.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- разработана модель древесины рассеяннососудистых пород, учитывающая особенности её анатомического строения на трёх структурных уровнях;
- разработана методика прогнозирования упругих характеристик древесины, модифицированной полимерами, проникающими в её клеточные стенки;
- разработан комплекс высокочувствительной аппаратуры для определения структурно-механических характеристик древесины при растяжении;
- определены структурно-механические характеристики, в том числе коэффициенты Пуассона, натуральной и модифицирован-

76039P

ной древесины при растяжении;

- разработана методика расчёта параметров моделей натуральной и модифицированной древесины на основании экспериментальных структурно-механических характеристик;

- с применением разработанных моделей получены зависимости для вычисления модулей упругости и коэффициентов Пуассона натуральной и модифицированной фенолоспиртами древесины берёзы и ольхи.

Практическая ценность. Практическая ценность работы состоит в получении исходных расчетных данных необходимых для проектирования изделий из модифицированной древесины. Предложенная в работе структурно-механическая модель может быть использована для прогнозирования механических свойств древесины, оптимизации процессов прессования, склеивания, резания, сушки и других технологических процессов, связанных с деформированием древесины. Разработанный комплекс высокочувствительной измерительной аппаратуры позволяет производить одновременную запись деформаций образца в трёх взаимно перпендикулярных направлениях и может быть использован при испытаниях не только древесины, но и других анизотропных материалов.

Автор защищает следующие основные результаты:

1. Модель строения древесины, представляющую собой армированную сотовую конструкцию, выполненную из транслопного материала;
2. Модель древесины, модифицированной наполнителями, проникающими в клеточные стенки;
3. Методику расчёта параметров модели по экспериментальным значениям структурно-механических характеристик древесины;
4. Методику прогнозирования упругих характеристик натуральной и модифицированной древесины;
5. Измерительный комплекс для испытаний древесины на растяжение;
6. Результаты экспериментальных исследований структурно-механических характеристик натуральной и модифицированной древесины при растяжении;
7. Расчётные зависимости для прогнозирования упругих характеристик древесины берёзы и ольхи с различной начальной плотностью и степенью наполнения полимером фенолоспиртов.

Резюме и внедрение результатов работы. Тема диссертационной работы соответствует совместному научному направле-

нию ПНИИ модификации древесины и кафедры сопротивления материалов БТИ им. С.М.Кирова: "Разработка научных основ модифицирования древесины термохимическим методом, исследование свойств модифицированной древесины, совершенствование процессов модифицирования древесины" (ГБ 81-14, гос. регистр. № 81011548). Результаты работы внедрены на НПО Центр (г.Минск). Разработанный в диссертационной работе комплекс измерительной аппаратуры поверен Госстандартом СССР и используется при проведении научных исследований, а также в учебном процессе на кафедре сопротивления материалов. Результаты экспериментальных исследований использованы в учебнике для вузов по курсу "Древесиноведение с основами лесного товароведения".

Апробация работы. Теоретические и практические результаты работы докладывались и обсуждались:

- на Всесоюзной научной конференции "Теоретические аспекты модифицирования древесины" (г.Рига, 1983г.);
- на Всесоюзной научной конференции "Комплексное и рациональное использование лесных ресурсов" (г.Минск, 1985г.);
- на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава БТИ им. С.М.Кирова (г.Минск, 1981-1986г.г.).

Публикации. По результатам научных исследований опубликовано семь печатных работ.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, семи разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Изложена на 179 страницах машинописного текста и содержит 56 рисунков, 16 таблиц, 5 приложений на 42 страницах, список использованной литературы (121 наименование).

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемого вопроса, сформулирована цель диссертационной работы.

В первом разделе работы проведен анализ экспериментальных и теоретических методов исследования структурно-механических характеристик древесины. Сформулированы предпосылки создания новой, более точной модели строения древесины. Показано, что модель должна учитывать особенности анатомического строения древесины на трёх структурных уровнях. При этом конфигурация ячеек модели должна быть близкой к реальной, что обеспечит соответствие напряжённого состояния материала модели и древесины. Особенно важным это условие представляется для модели

древесины, модифицированной наполнителями, проникающими в её клеточные стенки, т.к. в этом случае макро- и микроструктура исходного материала остаётся практически неизменной.

Отмечено, что существующие модели позволяют достаточно точно прогнозировать модули упругости древесины, модифицированной наполнителями, не проникающими в клеточные стенки. Указано на отсутствие достоверной модели древесины, модифицированной наполнителями, проникающими в её клеточные стенки. Критерием достоверности модели должно быть соответствие структурно-механических характеристик модели и древесины.

Анализ различных методов экспериментального исследования упругих характеристик древесины показал, что одним из наиболее достоверных способов их можно определить при испытаниях на растяжение. Однако, такие характеристики как натуральной, так и модифицированной древесины рассеяннососудистых пород при растяжении практически не изучены. Одной из главных причин, сдерживающих исследования деформативности древесины при растяжении, особенно это относится к определению коэффициентов Пуассона, является техническая сложность измерения весьма незначительных поперечных деформаций исследуемого материала в продольном структурном направлении.

На основании анализа структурных особенностей материала и конфигурации образцов, применяемых при испытаниях на растяжение, а также погрешностей измерения, возникающих при использовании известной аппаратуры, установлена необходимость разработки комплекса специальной высокочувствительной аппаратуры, для исследования деформативных характеристик древесины при растяжении.

Во втором разделе разработаны структурно-механические модели натуральной и модифицированной древесины. В качестве модели натуральной древесины рассеяннососудистых пород рассматривается пространственная конструкция (рис. I). Она образована тремя типами структур: I, II и III, являющихся аналогами, соответственно, механических, запасающих и проводящих тканей древесины. На макроскопическом уровне древесина представлена в виде сбалансированной слоистой конструкции, каждый слой которой моделирует определённый тип тканей древесины. На основании исследований микросрезов древесины берёзы и ольхи установлено, что большинство клеток либриформа имеет сравнительно правильную шестиугольную форму поперечного сечения. Это позволяло

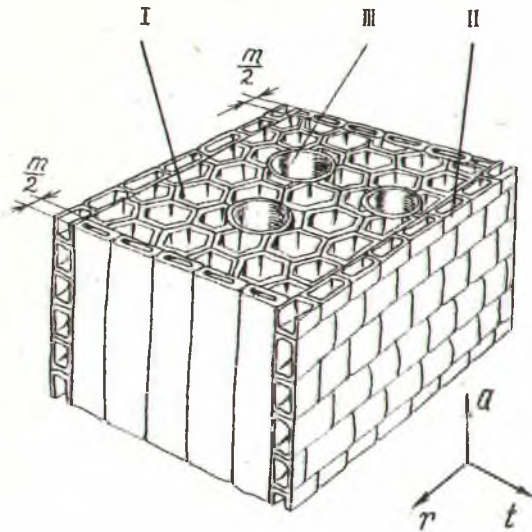


Рис. I. Модель древесины рассеянно-сосудистых пород.

идеализировать микростроение механических тканей древесины в виде сотовой конструкции. С целью учёта влияния сравнительно толстых стенок клеток либриформа, образующих приграничную зону годичного слоя, в сотовую конструкцию введён дополнительный слой -  $m$ , армирующий её в тангенциальном направлении.

Структура-аналог запасочных тканей древесины моделирует сердцевинный

луч и состоит из нескольких рядов пустотелых ячеек, имитирующих паренхимные клетки. Продольные оси ячеек ориентированы в радиальном структурном направлении.

Проводящие ткани древесины представлены в виде пустот между шестигранными ячейками в структуре-аналоге механических тканей и моделируют полости крупных сосудов. Мелкие сосуды, волокнистые и сосудистые трахеиды в поперечном сечении сходны с клетками либриформа и выполняют как проводящую, так и механическую функции и поэтому отнесены к структуре-аналогу механических тканей древесины.

На основании анализа особенностей субмикростроения клеточных стенок древесины, материал модели принят квазисплошным, квазиоднородным и транслопным. Модули упругости материала обозначены  $E_1, E_2$ , а коэффициенты Пуассона  $\mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{33}$ . Направление совпадающее с продольной осью идеализированной клетки имеет индекс 1, любое поперечное - 2. Здесь и далее первый индекс коэффициента Пуассона означает направление продольной деформации, второй - поперечной. Плотность материала модели принята равной плотности древесинного вещества.

Для определения упругих характеристик структуры I-го типа, сотовую конструкцию рассматривали как квазисплошной и квазиоднородный трёхмерный массив, образованный повторением однотипных элементарных ячеек. Силовые факторы, приложенные к каждой ячейке, находили раскрывая статическую неопределенность, используя для этого симметрию и граничные условия равновесия сотовой конструкции. В результате расчёта были получены следующие упругие характеристики структуры-аналога механических тканей древесины

$$E_a^{(1)} = E_1 (1 - \mathcal{X}); \quad (1)$$

$$E_r^{(1)} = E_2 4 R_1^3 [\sqrt{3} (3 R_1^2 + 1)]^{-1}; \quad (2)$$

$$E_t^{(1)} = C_1 E_r; \quad (3)$$

$$\mu_{ar}^{(1)} = \mu_{at}^{(1)} = \mu_{12}; \quad (4)$$

$$\mu_{rt}^{(1)} = \mu_{tr}^{(1)} = (R_1^2 + 1)(R_1^2 - 1)^{-1}; \quad (5)$$

$$\mu_{ra}^{(1)} = \mu_{ta}^{(1)} = \mu_{21}, \quad (6)$$

где  $\mathcal{X} = 1 - \rho^{(1)}/\rho_m$  - пористость сотовой конструкции ( $\rho^{(1)}$  - плотность сотовой конструкции);  $R_1 = l/\ell = \sqrt{3}(1 - \mathcal{X})$  - соотношение между длиной- $l$  и толщиной- $\ell$  стенки сотовой ячейки;  $C_1$  - коэффициент относительной жёсткости структуры I-го типа в поперечном направлении.

В связи с малостью объёма, занимаемого в структуре армирующим слоем  $m$  (3-5%), его влияние учитывали только при определении  $E_t^{(1)}$ , путём введения коэффициента  $C_1$ . Как показал анализ выражения (5), коэффициент Пуассона тонкостенной сотовой конструкции при нагружении в поперечном направлении близок к единице. Это позволяет объяснить природу сравнительно больших коэффициентов Пуассона древесины при нагружении в поперечных структурных направлениях.

Упругие характеристики структуры II-го типа были заданы через упругие постоянные материала модели с учётом его ориентации и коэффициентов жёсткости  $C_2$  и  $C_3$

$$E_a^{(2)} = E_t^{(2)} = C_2 E_2; \quad (7)$$

$$E_r^{(2)} = C_3 E_1; \quad (8)$$

$$\mu_{rt}^{(2)} = \mu_{ra}^{(2)} = \mu_{..}; \quad (9)$$

$$\mu_{ta}^{(2)} = \mu_{at}^{(2)} = \mu_{22}; \quad (10)$$

$$\mu_{ar}^{(2)} = \mu_{tr}^{(2)} = \mu_{21}, \quad (11)$$



где  $C_2$  - коэффициент жёсткости структуры-аналога запасавших тканей древесины в продольном и тангенциальном направлениях,  $C_3$  - то же, в радиальном направлении.

Третий тип механической структуры модели - аналог проводящих тканей древесины моделирует полости крупных сосудов и обладает нулевой жёсткостью.

Плотности и парциальные объёмы структур-аналогов механических, запасавших и проводящих тканей древесины были обозначены, соответственно,  $\rho^{(1)}, \rho^{(2)}, \rho^{(3)}$  и  $q^{(1)}, q^{(2)}, q^{(3)}$ . Тогда, учитывая, что  $\rho^{(3)} = 0$

$$\rho^{(1)} = \frac{\rho_0}{q^{(1)} + \alpha q^{(2)}}, \quad (12)$$

где  $\rho_0$  - плотность модели и моделируемой древесины,  $\alpha$  - соотношение плотностей ( $\alpha = \rho^{(2)}/\rho^{(1)}$ ).

Выбранная модель древесины на макро- уровне является многослойной, в которой слои работают без относительного проскальзывания. Учитывая значительное отличие упругих характеристик отдельных слоёв, упругие характеристики модели определяются с учётом взаимного стеснения деформаций между слоями. При выводе расчётных зависимостей, основываясь на анализе соотношений между экспериментальными значениями упругих постоянных древесины, не накладывали предварительного условия симметрии матрицы упругих податливостей модели. Площадь сечения  $i$ -го слоя в единичном объёме модели обозначали  $q^{(i)}$  (при этом сумма площадей отдельных однотипных слоёв  $q^{(i)}$  численно равна парциальному объёму механической структуры того же типа, например  $q^{(1)}$ ). В результате была получена система уравнений связывающая упругие характеристики модели и составляющих её слоёв

$$\mu_{ar} = \sum_{i=1}^n q^{(i)} E_r^{(i)} \frac{\mu_{ar}^{(i)}}{\lambda^{(i)}} \left( \sum_{i=1}^n q^{(i)} E_r^{(i)} \frac{1}{\lambda^{(i)}} \right)^{-1}; \quad (13)$$

$$\mu_{ra} = \sum_{i=1}^n q^{(i)} E_a^{(i)} \frac{\mu_{ra}^{(i)}}{\lambda^{(i)}} \left( \sum_{i=1}^n q^{(i)} E_a^{(i)} \frac{1}{\lambda^{(i)}} \right)^{-1}; \quad (14)$$

$$E_a = (1 - \mu_{ar} \mu_{ra}) \sum_{i=1}^n \frac{q^{(i)} E_a^{(i)}}{\lambda^{(i)}}; \quad (15)$$

$$E_r = (1 - \mu_{ra} \mu_{ar}) \sum_{i=1}^n \frac{q^{(i)} E_r^{(i)}}{\lambda^{(i)}}; \quad (16)$$

$$\mu_{at} = \sum_{i=1}^n q^{(i)} \frac{\lambda_{at}^{(i)}}{\lambda^{(i)}} - \mu_{ar} \sum_{i=1}^n q^{(i)} \frac{\lambda_{rt}^{(i)}}{\lambda^{(i)}}; \quad (17)$$

$$\mu_{rt} = \sum_{i=1}^n q^{(i)} \frac{\lambda_{rt}^{(i)}}{\lambda^{(i)}} - \mu_{ra} \sum_{i=1}^n q^{(i)} \frac{\lambda_{at}^{(i)}}{\lambda^{(i)}}; \quad (18)$$

$$\frac{1}{E_t} = \frac{\mu_{ar}}{E_a} \sum_{i=1}^n \eta^{(i)} \frac{E_a \lambda_{ta}^{(i)}}{E_t \lambda^{(i)}} + \frac{\mu_{rt}}{E_r} \sum_{i=1}^n \eta^{(i)} \frac{E_r \lambda_{tr}^{(i)}}{E_t \lambda^{(i)}} + \sum_{i=1}^n \frac{\eta^{(i)}}{E_t^{(i)}} \left( 1 - \frac{\mu_{at} \lambda_{ta}^{(i)}}{\lambda^{(i)}} - \frac{\mu_{rt} \lambda_{tr}^{(i)}}{\lambda^{(i)}} \right); \quad (19)$$

$$\mu_{ta} = E_t \left( \frac{1}{E_a} \sum_{i=1}^n \eta^{(i)} \frac{E_a \lambda_{ta}^{(i)}}{E_t \lambda^{(i)}} - \frac{\mu_{ra}}{E_r} \sum_{i=1}^n \eta^{(i)} \frac{E_r \lambda_{tr}^{(i)}}{E_t \lambda^{(i)}} \right); \quad (20)$$

$$\mu_{tr} = E_t \left( \frac{1}{E_a} \sum_{i=1}^n \eta^{(i)} \frac{E_r \lambda_{tr}^{(i)}}{E_t \lambda^{(i)}} - \frac{\mu_{ar}}{E_a} \sum_{i=1}^n \eta^{(i)} \frac{E_a \lambda_{ta}^{(i)}}{E_t \lambda^{(i)}} \right); \quad (21)$$

где  $\lambda^{(i)} = 1 - \mu_{ar}^{(i)} \mu_{ra}^{(i)}$ ;  $\lambda_{at}^{(i)} = \mu_{at}^{(i)} + \mu_{rt}^{(i)} \mu_{ar}^{(i)}$ ;  $\lambda_{tr}^{(i)} = \mu_{rt}^{(i)} + \mu_{at}^{(i)} \mu_{ra}^{(i)}$ ;  $\lambda_{ta}^{(i)} = \mu_{ta}^{(i)} + \mu_{tr}^{(i)} \mu_{ra}^{(i)}$ ;  $\lambda_{tr}^{(i)} = \mu_{tr}^{(i)} + \mu_{ta}^{(i)} \mu_{ar}^{(i)}$ .

С учётом выражений (I)-(I3) система уравнений (I3)-(2I) позволяет записать упругие характеристики модели через её структурные параметры  $C_1, C_2, C_3, \eta^{(i)}, \alpha, \eta^{(ii)}$  упругие постоянные материала  $E_1, E_2, \mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{22}$  и плотность  $\rho_0$ .

Предложенная модель модифицированной древесины отличается от рассмотренной модели натуральной древесины наличием полимера в материале конструкции и, как следствие, иными его упругими характеристиками. Для описания упругих характеристик материала этой модели использованы приведённые упругие постоянные  $E_{ij}^*$  и  $\mu_{ij}^*$  ( $i, j=1, 2$ ), т.е. полученные без учёта изменения толщины клеточных стенок, вызванного остаточным набуханием. Они приведены к толщине клеточных стенок исходной древесины. В этом случае, подставляя в систему уравнений (I3)-(2I) уже известные структурные параметры модели и значения упругих характеристик древесины, модифицированной растворами полимера различной концентрации, можно вычислить значения приведённых упругих постоянных материала модели при различной степени наполнения полимером. В качестве параметра степени наполнения клеточных стенок использовано отношение

$$S = \frac{V_H}{V_M} = \left( \frac{\rho_{228}}{\rho_0} + 0,3\rho_{228} - 1 \right) \left( 1 - \frac{\rho_1}{k} - \rho_1 \right)^{-1}, \quad (22)$$

где  $V_H$  - объём наполнителя,  $V_M$  - объём клеточных стенок древесины (равен объёму материала модели);  $\rho_1$  - плотность наполнителя;  $k$  - долевая массовая концентрация водного раствора наполнителя;  $\rho_{228}$  - плотность древесинного вещества.

Полученная расчётная зависимость позволяет определять параметр  $S$  по величине исходной плотности древесины  $\rho_0$  и концентрации раствора наполнителя  $k$ , легко поддающимся оперативному

технологическому контролю в производственных условиях.

В третьем разделе рассмотрена методика экспериментального исследования структурно-механических характеристик древесины, необходимых для расчёта параметров моделей. В качестве представителей группы рассеяннососудистых пород исследовали древесину берёзы (*Betula verrucosa*) и ольхи (*Alnus glutinosa*) с плотностью 679 кг/м<sup>3</sup> и 423 кг/м<sup>3</sup>, соответственно. Учитывая, что механические свойства модифицированной древесины при растяжении практически не изучены, исследовали древесину, модифицированную наполнителями как проникающими (водные растворы фенолоспиртов различной концентрации), так и не проникающими (смола ПН-1 с инициатором полимеризации - перекисью бензоила в количестве 0,5%) в её клеточные стенки.

Экспериментальное определение механических характеристик производили с применением специального измерительного комплекса. В его состав входили: разрывная машина Р-5, дополненная высокочувствительным электронно-механическим динамометром, три тензометра для одновременного измерения деформаций образца в трёх структурных направлениях, блок сопряжения и три планшетных двухкоординатных самописца. В качестве преобразователей линейных перемещений в приборах использованы механотронные датчики для прецизионных измерений.

Конструкция динамометра предусматривает снижение его паразитной боковой чувствительности. Конструкция тензометра для измерения продольной деформации обеспечивает надёжное и стабильное во времени положение корпусов прибора на образце при минимальном стеснении деформаций. Это достигается за счёт применения опорных устройств, выполненных в виде двух рядов шарикоподшипников, установленных с равными промежутками на осях равноудалённых от фиксирующих игл, снабжённых регулируемыми упорами.

При испытаниях древесины на растяжение вдоль волокон используется образец имеющий рабочую часть, выполненную в виде тонкой полосы. Такая конфигурация образца значительно затрудняет процесс измерения его поперечных деформаций. Для их измерения разработан специальный тензометр (рис.2). Отличительной особенностью тензометра является применение механической мультипликации перемещений, трансформируемых от упоров 1, соприкасающихся с поверхностью образца 2, к измерительному штырю механотрона 3. Применение соединений с упругими шарнирами 4 ис-

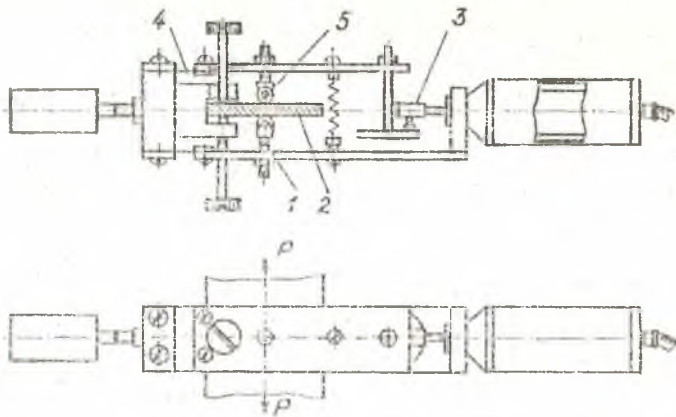


Рис. 2. Схематическое изображение тензомера для измерений поперечной деформации.

ключает зону "нечувствительности" прибора, а наличие миниатюрных шарикоподшипников 5 в упорах 1, позволяет избавиться от погрешности, возникающей при повороте последних относительно поверхности образца при его деформировании. Работа механизма 3 на разгрузку позволяет производить испытание вплоть до разрушения образца. Для измерения поперечной деформации образца в направлении его широкой кромки использовали тензомер, отличающийся от рассмотренного конструктивным оформлением узла крепления на образце.

Тарировка оборудования производилась в Белорусском центре стандартизации и метрологии. По результатам тарировки получены справки о факультативной проверке тензомеров и динамометра.

В четвёртом разделе работы изложены результаты экспериментального исследования структурно-механических характеристик древесины. Для определения упругих постоянных при испытаниях образцов производилась одновременная запись диаграмм деформирования в трёх структурных направлениях. Определение модулей сдвига производили при испытаниях на растяжение образцов с выклеенной рабочей частью, оси которой параллельны одному из главных направлений анизотропии, и составляют угол 45° с другими главными направлениями. При испытаниях таких образцов, выполненных из натуральной древесины берёзы и ольхи, а также древесины берёзы, модифицированной 35%-ным раствором фенолоспиртов, в продольно-тангенциальной плоскости получены отрицательные величины коэффициентов Пуассона.

Основные результаты, полученные при обработке диаграмм деформирования образцов, приведены в табл. I. Сведения с проч-

Табл. I. Упругие характеристики натуральной и модифицированной древесины

Материал	$E_d$ (МПа)	$\mu_{ar}$	$\mu_{at}$	$E_r$ (МПа)	$\mu_{rt}$	$\mu_{ra}$	$E_t$ (МПа)	$\mu_{tr}$	$\mu_{ta}$	$G_{ar}$ (МПа)	$G_{at}$ (МПа)	$G_{rt}$ (МПа)
Береза натур.	20370	0,341	0,445	1190	0,566	0,029	644	0,321	0,013	1031	927	174
Береза + 10% ФС	21030	0,346	0,475	1799	0,605	0,039	967	0,343	0,017	-	-	-
Береза + 20% ФС	21270	0,353	0,507	1962	0,606	0,042	1062	0,337	0,017	-	-	-
Береза + 35% ФС	21890	0,374	0,595	2149	0,619	0,055	1155	0,354	0,021	1650	1389	437
Береза + 50% ФС	21940	0,386	0,548	2714	0,621	0,071	1598	0,362	0,029	-	-	-
Береза + ПН-I	24810	0,392	0,622	2571	0,617	0,052	1907	0,417	0,027	2065	1222	878
Ольха натур.	9900	0,340	0,339	1013	0,587	0,043	390	0,288	0,045	890	767	127
Ольха + 10% ФС	10740	0,376	0,395	1298	0,623	0,069	975	0,342	0,063	-	-	-
Ольха + 20% ФС	11300	0,387	0,453	1581	0,622	0,059	1210	0,424	0,061	-	-	-
Ольха + 35% ФС	12200	0,384	0,504	1799	0,612	0,069	1463	0,455	0,089	1779	1458	226
Ольха + 50% ФС	12720	0,381	0,508	2593	0,589	0,107	1674	0,361	0,094	-	-	-
Ольха + ПН-I	13430	0,380	0,441	2176	0,677	0,110	1321	0,513	0,088	1638	1175	742

Примечания

1. Береза + 10% ФС означает, что береза модифицирована 10%-ым раствором фенолоспиртов, Береза + ПН-I - береза модифицирована ненасыщенной полиэфирной смесью ПН-I.

2. Значения плотности материалов приведены в табл.2.

ности древесины  $-P_i$  при растяжении в структурных направлениях приведены в табл.2. Средняя влажность образцов из натуральной

Табл.2. Зависимость предела прочности  $P_i$  при растяжении древесины в структурных направлениях от вида технологической обработки

Материал	$P_a$ (МПа)	$P_r$ (МПа)	$P_t$ (МПа)	Плотность кг/м <sup>3</sup>
Берёза натур.	146,3	11,3	5,6	679
Берёза + 10% ФС	153,2	11,7	6,2	719
Берёза + 20% ФС	127,4	12,1	7,6	741
Берёза + 35% ФС	132,1	12,5	8,0	779
Берёза + 50% ФС	135,2	12,3	8,1	828
Берёза + ПН-1	194,8	13,4	10,2	1188
Ольха натур.	90,8	8,3	4,8	423
Ольха + 10% ФС	89,3	8,4	5,5	496
Ольха + 20% ФС	92,0	9,0	5,9	562
Ольха + 35% ФС	94,3	10,6	6,7	634
Ольха + 59% ФС	98,1	10,7	7,5	749
Ольха + ПН-1	115,2	10,2	7,6	1196

древесины и древесной массы образцов из модифицированной древесины составляла 10±1%. Как следует из анализа табл.1, модифицирование древесины фенолоспиртами приводит к увеличению жёсткости материала, особенно в поперечных структурных направлениях. Предел прочности древесины берёзы при растяжении вдоль волокон несколько уменьшается, что может быть связано с повышением её хрупкости. При нагружении в поперечных структурных направлениях предел прочности модифицированной древесины оказался выше, чем для натуральной. Модифицирование древесины берёзы и ольхи смолой ПН-1 приводит к однозначному увеличению её упругих постоянных и пределов прочности.

**В пятом разделе** исследована анизотропия упругих деформаций древесины. На основании анализа экспериментальных данных установлено, что степень анизотропии упругих деформаций древесины вследствие модифицирования существенно снижается.

Получены расчётные зависимости на основании которых составлена программа для вычисления и построения на ЭВМ пространственных диаграмм анизотропии упругих характеристик ортотропного тела. С применением разработанной методики рассчитаны значения и построены диаграммы анизотропии упругих характеристик древесины при растяжении.

Получено аналитическое выражение, показывающее связь между упругими постоянными ортотропного тела с несимметричной матрицей упругих податливостей, при которой будет существовать область отрицательных величин коэффициентов Пуассона

$$\frac{1}{E_a} + \frac{1}{E_t} + \frac{1}{G_{at}} > 2 \sqrt{\frac{\mu_{at} \mu_{ta}}{E_a E_t}} \quad (23)$$

В шестом разделе работы изложена методика определения параметров моделей древесины. Система уравнений для вычисления параметров модели натуральной древесины была получена путём приравнивания в выражениях (13)-(21) соответствующих упругих характеристик модели и древесины. Достаточно эффективных стандартных программ ЭВМ для решения полученной системы нелинейных алгебраических уравнений нами не обнаружено. В связи с этим поставленная задача была сведена к задаче нелинейного программирования, т.е. находили минимум квадрата разности между величинами упругих характеристик, рассчитанными на модели  $-R_j(x_i)$ , и определёнными экспериментально  $-R_j^*$ , где  $i=I, \dots, II$ , а  $j=I, \dots, 9$ . Все переменные масштабировали. Вновь поставленную задачу удалось решить с использованием программы LPNLP, реализующей модифицированный метод Лагранжа. Исходный текст программы был модифицирован с целью работы ЭВМ в диалоговом режиме. В окончательном варианте в качестве целевой функции было использовано уравнение упругого потенциала, записанное для трансропного материала модели, а ограничения задачи типа равенств имели вид

$$\Phi_j = \left| \frac{R_j(x_i)}{R_j^*} - 1 \right| = 0 \quad (24)$$

Максимальный статистический вес в программе был приписан ограничениям задачи, которые в конечном итоге выполнялись с точностью не хуже 1%. В результате решения были получены параметры моделей натуральной древесины. В отличие от упругих постоянных, структурные параметры моделей существенно отличаются. Как показал анализ, различия могут быть объяснены с учётом особенностей анатомического строения древесины берёзы и ольхи.

Для вычисления приведённых упругих постоянных материала модели модифицированной древесины  $E_i^*$  и  $\mu_{ij}^*$ , при различной степени наполнения полимером  $S$ , в систему уравнений (13)-(21) подставляли структурные параметры модели натуральной древесины и упругие постоянные древесины, модифицированной растворами фенолоспиртов различной концентрации.

В седьмом разделе работы рассмотрено применение разрабо-

танной модели для определения упругих характеристик натуральной и модифицированной древесины. В результате анализа взаимосвязи анатомического строения древесины и её механических характеристик показано, что для прогнозирования упругих характеристик древесины с различной плотностью необходимо использовать модель, состоящую из механических структур, жёсткость которых зависит от плотности. В представленной модели это условие не выполняется только для второго типа механической структуры - аналога запасаящих тканей древесины. Как показал анализ конфигурации паренхимных клеток, образующих сердцевинные лучи, при нагружении в структурных направлениях их стенки работают в основном на растяжение-сжатие. Поэтому связь между их плотностью и жёсткостью может быть аппроксимирована линейной зависимостью

$$E_a^{(2)} = E_t^{(2)} = E_2 c_2 \rho_0 / \rho_0'; \quad (25)$$

$$E_r^{(2)} = E_1 c_3 \rho_0 / \rho_0', \quad (26)$$

где  $\rho_0'$  - плотность древесины, для которой рассчитаны значения  $c_2$  и  $c_3$ . Видоизменённый вариант модели позволяет вычислять упругие характеристики натуральной и модифицированной древесины с различной начальной плотностью и степенью наполнения полимером.

Для определения упругих характеристик натуральной древесины в систему уравнений (13)-(21) подставляют структурные параметры модели, упругие постоянные её материала и плотность  $\rho_0$ . Для вычисления упругих характеристик модифицированной древесины необходимо располагать дополнительной зависимостью, которая связывает приведённые упругие постоянные материала модели с параметром наполнения полимером. Такая зависимость может быть получена методом регрессионного анализа значений  $E_t^*$  и  $\mu_{ij}^*$ , рассчитанных на модели с использованием экспериментальных значений упругих характеристик модифицированной древесины с различным параметром наполнения  $S$ .

По предлагаемой методике были рассчитаны упругие характеристики древесины берёзы и ольхи с различной начальной плотностью, модифицированной растворами фенолоспиртов с различной концентрацией. Построены графики полученных зависимостей. С целью упрощения вычислений при практическом использовании полученные данные были подвергнуты регрессионному анализу по двум независимым параметрам -  $\rho_0$  и  $S$ . Расчёт производили на ЭВМ с применением программы реализующей метод Ефромсона. В

результате были получены регрессионные коэффициенты уравнения, имеющего вид полинома пятой степени. Упругие характеристики натуральной древесины могут быть получены из уравнения как частный случай модифицированной с нулевым наполнением полимером. Проведённая экспериментальная проверка полученных зависимостей показала их достоверность (максимальная ошибка составила 11% при среднем значении 4-6%).

Разработанная методика внедрена на НПО Центр в 1985 г. и используется при прогнозировании упругих характеристик модифицированной древесины берёзы, полученной путём центробежной пропитки фенолоспиртами.

Основные теоретические и практические результаты работы состоят в следующем

1. Разработана новая структурно-механическая модель древесины рассеяннососудистых пород, учитывающая особенности её строения на трёх структурных уровнях. Древесина представлена как сбалансированная слоистая конструкция, состоящая из трёх типов механических структур, являющихся аналогами механических, запасующих и проводящих тканей. Структура-аналог механических тканей представлена в виде армированной сотовой конструкции, ячейки которой моделируют клетки либриформа. Стенки ячеек при нагружении в поперечном направлении работают в основном на изгиб. Как показали проведённые расчёты, коэффициент поперечной деформации сотовой конструкции близок к единице, что позволяет объяснить природу весьма больших (более 0,5) коэффициентов Пуассона древесины при нагружении в поперечных структурных направлениях. В качестве слоя, армирующего сотовую конструкцию в тангенциальном направлении, выступает приграничная полоска годичного слоя. Структура-аналог запасующих тканей моделирует сердцевинный луч и состоит из ячеек, продольные оси которых ориентированы в радиальном направлении. Полости крупных сосудов, образующие основной объём проводящих тканей, представлены в виде пустот между сотовыми ячейками. Материал модели принят транслопным с плотностью равной плотности древесинного вещества. С учётом взаимного стеснения деформаций между слоями получена система уравнений, связывающая упругие характеристики модели с упругими постоянными её материала. Для определения параметров модели предложено использовать упругие постоянные древесины в структурных направлениях.

2. Разработан измерительный комплекс для испытаний древесины на растяжение. В состав комплекса входят: датчик деформации,



тензометры для измерения продольной и поперечных деформаций, выполненные на базе механотронов, а также блок сопряжения с планшетными двухкоординатными самописцами. Применение прецизионных механотронных преобразователей перемещений позволило получить высокую точность и чувствительность приборов. Использование упругих шарниров и механической мультипликации перемещений в тензометрах для измерения поперечной деформации, позволило произвести измерение весьма малых деформаций образцов с рабочей частью выполненной в виде тонкой полосы.

3. Получены значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона натуральной и модифицированной древесины при растяжении. Экспериментально установлено, что при растяжении натуральной древесины под углом  $45^\circ$  к продольному и тангенциальному направлениям коэффициент Пуассона имеет отрицательную величину. Получено аналитическое выражение, показывающее связь между упругими постоянными древесины, при которой будет существовать область отрицательных величин коэффициентов Пуассона. С применением ЭВМ построены пространственные диаграмма всех упругих характеристик древесины при растяжении.

4. Проведены исследования прочности натуральной и модифицированной древесины при растяжении. Установлено, что в результате модифицирования предел прочности древесины повышается. Исключение составляет предел прочности при растяжении вдоль волокон древесины берёзы, модифицированной фенолоспиртами. Снижение предела прочности в этом случае составило 8%.

5. На основании анализа, проведённого с применением ЭВМ, определено минимальное количество варьируемых параметров модели, обеспечивающее адекватность упругих характеристик модели и древесины. Такими параметрами являются: парциальные объёмы занимаемые механическими, запасующими и проводящими тканями древесины, соотношение их плотностей, коэффициенты жёсткости идеализированного сердцевинного луча в структурных направлениях, коэффициент относительной жёсткости структуры-аналога механических тканей в поперечных направлениях. Значения упругих постоянных материала модели и её структурных параметров рассчитаны численным методом на ЭВМ, путём минимизации уравнений упругого потенциала, записанного для материала модели. В качестве ограниченной задачи использовали разность между упругими характеристиками древесины, рассчитанными на модели и определёнными экспериментально.

6. Предложена методика прогнозирования упругих характеристик древесины с различной начальной плотностью на модели строения. Получены регрессионные зависимости упругих постоянных древесины берёзы и ольхи от их плотности.

7. Разработана модель древесины, модифицированной наполнителями, проникающими в её клеточные стенки. Для исследования влияния модифицирования предложено использовать приведённые упругие постоянные материала модели, полученные без учёта остаточного набухания древесины. В качестве параметра, характеризующего степень наполнения древесины полимером, использовано отношение объёмов полимера и древесинного вещества.

8. Разработана методика прогнозирования упругих характеристик древесины с различной начальной плотностью, модифицированной полимерами, проникающими в её клеточные стенки. Получены регрессионные зависимости упругих характеристик древесины берёзы и ольхи от плотности и концентрации фенолоспиртов в пропиточном растворе. Опытная проверка подтвердила достоверность полученных зависимостей.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1. Дорошко А.В., Макаревич С.С. Упругие свойства модифицированной древесины при растяжении. // Механическая технология древесины, Минск, 1983, вып.13, с.64-66.

2. Дорошко А.В. Тензосметр для измерения поперечных деформаций. // Заводская лаборатория, 1984, т.50, №5, с.88-89.

3. Дорошко А.В. Высокочувствительный электронно-механический динамометр. // Механическая технология древесины, Минск, 1984, вып.14, с.57-59.

4. Дорошко А.В. Определение модулей сдвига модифицированной древесины при растяжении. // Механическая технология древесины, Минск, 1985, вып.15, с.67-70.

5. Дорошко А.В., Макаревич С.С., Вихров Ю.В. Прогнозирование механических свойств древесины, модифицированной наполнителями, проникающими в её клеточные стенки. // Тез. докл. Всесоюз. конф. комплексное и рациональное использование лесных ресурсов, Минск, 1985, с.183-184.

6. Дорошко А.В. К вопросу об определении коэффициентов поперечной деформации при сжатии древесины вдоль волокон. // Лесной журнал, 1986, №1, с.66-69.

7. Макаревич С.С., Дорошко А.В. Изменение анизотропии

деформативных свойств древесины при модифицировании термохимическим способом. // Технология и оборудование заготовки и переработки древесины, 1986, вып. I, с. 76-80.



Александр Валентинович Дорошко  
Структурно-механические характеристики натуральной  
и модифицированной древесины рассеяннососудистых  
пород при растяжении

Подписано в печать 27.10.86. АТ Г7420. Формат 60x84 I/16  
Печать офсетная. Усл. печ. л. I, I7. Усл. кр.-отт. I, I7. Уч.-изд. л. I.

Тираж 100 экз. Заказ 599. Бесплатно.

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени технологический институт им. С.М.Кирова, 220630, Минск, Свердлова 13<sup>а</sup>  
Отпечатано на ротапринте Белорусского ордена Трудового Красного Знамени технологического института им. С.М.Кирова 220630. Минск, Свердлова, 13.