

# ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННИЦЫ ПРИ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОКЕ. ОБЗОР

© А. А. Орлов, В. Л. Соколов

УДК 674.048

ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет» г. Красноярск, Россия

В обзоре рассмотрены вопросы изменения физико-механических свойств древесины лиственницы, происходящие в результате гидротермической обработки.

Приведены данные о влиянии температуры и влажности материалов на прочность древесины при различных видах испытаний. Отмечены особенности влияния гидротермической обработки на качество шпона, полученного из древесины лиственницы.

Рассмотрены работы, описывающие связь между снижением прочностных характеристик и изменениями в химическом составе древесины. Представлены сведения о влиянии основных компонентов древесины на ее прочность.

Отмечены особенности распределения влажности в процессе сушки лиственничных пиломатериалов. Приведены данные о влиянии свободной влаги на прочностные показатели древесины.

В результате анализа литературных данных выявлены основные факторы, влияющие на физико-механические показатели древесины лиственницы.

In review are considered the questions of change physico-mechanical characteristics larches wood, resulting from water and heat processing.

They Are Brought given about influence of the temperature and moisture of material on toughness wood under different types of test. Cancelling to particularities of influence an water and heat processing on quality of lead got from wood larches.

It Is Considered work, describing relationship between reduction of toughness features and changes to chemical composition wood. Information is Presented about influence of the main components wood on its toughness.

Cancelling to particularities of distribution to moisture in process of drying boards from larches. They Are Brought given about influence free water on toughness of factors wood.

As a result of analysis literary given are revealed main factors, influencing upon physico-mechanical characteristics wod larches.

## **Введение**

Древесина лиственницы традиционно используется в строительстве, в производстве мебели, столярно-строительных конструкций и ряда композиционных материалов, таких как фанера, ДСтП, ЦСП и др.

Прочность и долговечность конструкций и изделий во многом определяется прочностью материалов, из которых они выполнены. В условиях рационального использования древесины и снижения расхода материала на производство единицы изделия на первый план выходит вопрос подбора рациональных сечений заготовок. Особое внимание в данном случае следует уделять прогнозированию прочностных характеристик элементов конструкций.

Поскольку древесина является анизотропным материалом растительного происхождения и обладает рядом уникальных свойств, при проектировании изделий необходимо учитывать следующие моменты. При переменных температурно-влажностных условиях возможна деформация элементов готовых изделий или сооружений [1]. Температуру и

влажность древесины в момент испытаний следует относить к основным технологическим факторам, влияющим на ее механические свойства [2]. Кроме того, при получении ряда композиционных материалов производится гидротермическая обработка сырья для придания древесине требуемых свойств, которые обеспечивают качество конечной продукции [3]. Влажность древесины, используемой в деревообработке, как правило, составляет 6 - 12%, поэтому необходима операция сушки. Естественно, в результате такой обработки происходит изменение свойств и химического состава древесины, о чем свидетельствует изменение ее цвета, развитие напряжений, коробление, образование трещин, снижение гигроскопичности и т.д. Эти изменения оказывают влияние на несущую способность элементов конструкций и долговечность изделий и, несомненно, должны быть учтены на стадии проектирования. Проблеме изменения физико-механических свойств древесины лиственницы при ее гидротермической обработке посвящен этот обзор.

## Обзорная часть

В процессе теплового воздействия на древесину происходит снижение её природной прочности вследствие механической и химической деструкции анатомических элементов и компонентов древесины.

Степень снижения прочности древесины, помимо внешних факторов, зависит от соотношения различных тканей и характера их распределения, размеров анатомических элементов и их встречаемости, строения клеточных стенок и от химического состава древесины.

Изменению прочности массивной древесины лиственницы в процессах гидротермической обработки посвящены работы Н. В. Качалина [4], К. Ф. Дьяконова [5,6] и др.

Н. В. Качалин исследовал изменение прочности древесины лиственницы при нагревании в автоклаве. Древесину с влажностью от 80 до 90 % нагревали при температуре 80, 100 и 120 °С в течение 6 часов. Установлено, что после тепловой обработки под давлением прочность древесины при сжатии вдоль волокон снижается. Зависимость предела прочности при сжатии вдоль волокон от температуры агента обработки описывается следующим уравнением:

$$\sigma = -0,0123 t^2 - 0,313 t + 689. \quad (1)$$

Удельная работы при ударном изгибе древесины лиственницы в указанном интервале температур практически не изменилась. К. Ф. Дьяконовым [5,6] проведен комплекс исследований по изучению снижения прочности древесины. Изучалось влияние различных температур (от 80 до 140 °С) в течение 6, 12, 24, 48 и 96 ч на древесину с влажностью выше предела насыщения клеточных стенок, а также 15 – 17 % и 2 – 3 %. При этом в каждом опыте влажность древесины поддерживалась постоянной. Автором установлено влияние температуры и продолжительности тепловой обработки на прочностные свойства древесины лиственницы (рисунки 1.1–2).

Приведенные данные показывают, что прочность при скалывании вдоль волокон древесины лиственницы снижается, но только после её обработки в сухом состоянии. Так, прочность древесины при температурах 80 и 100 °С во влажном состоянии не снизилась, в сухом же состоянии прочностные показатели уменьшились примерно на 30 %.

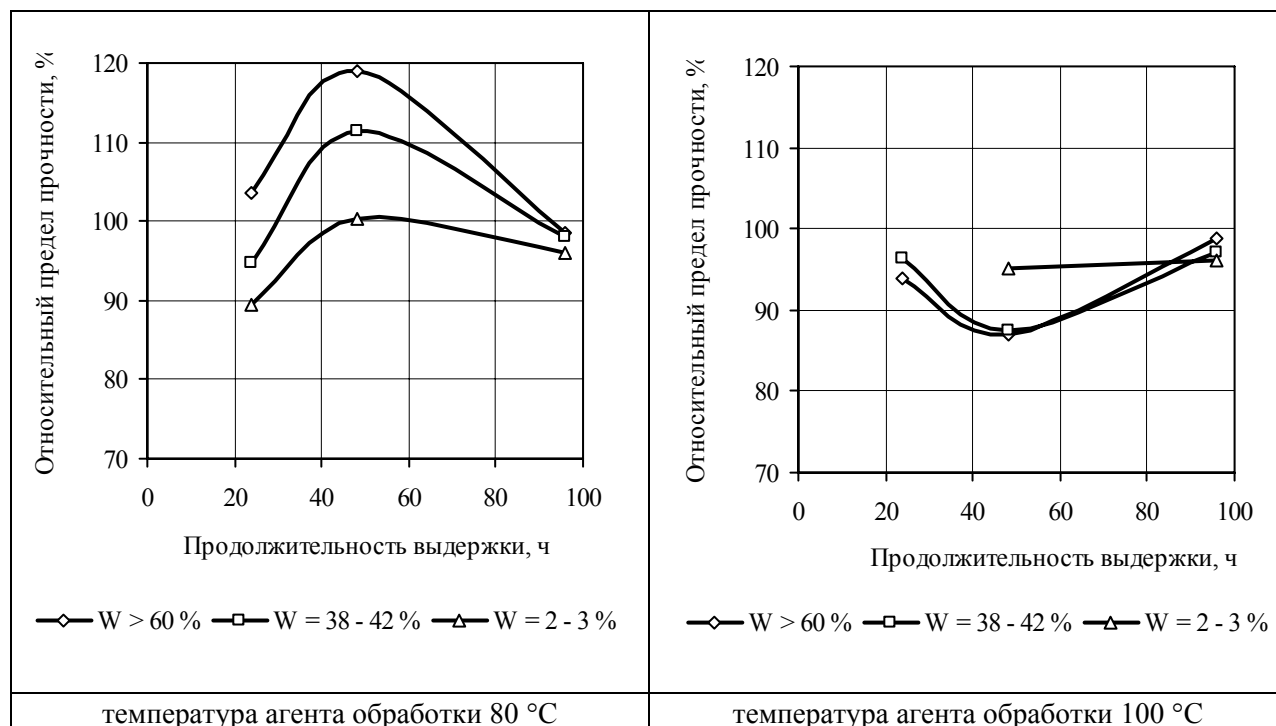


Рисунок 1 – Изменение предела прочности при сжатии вдоль волокон

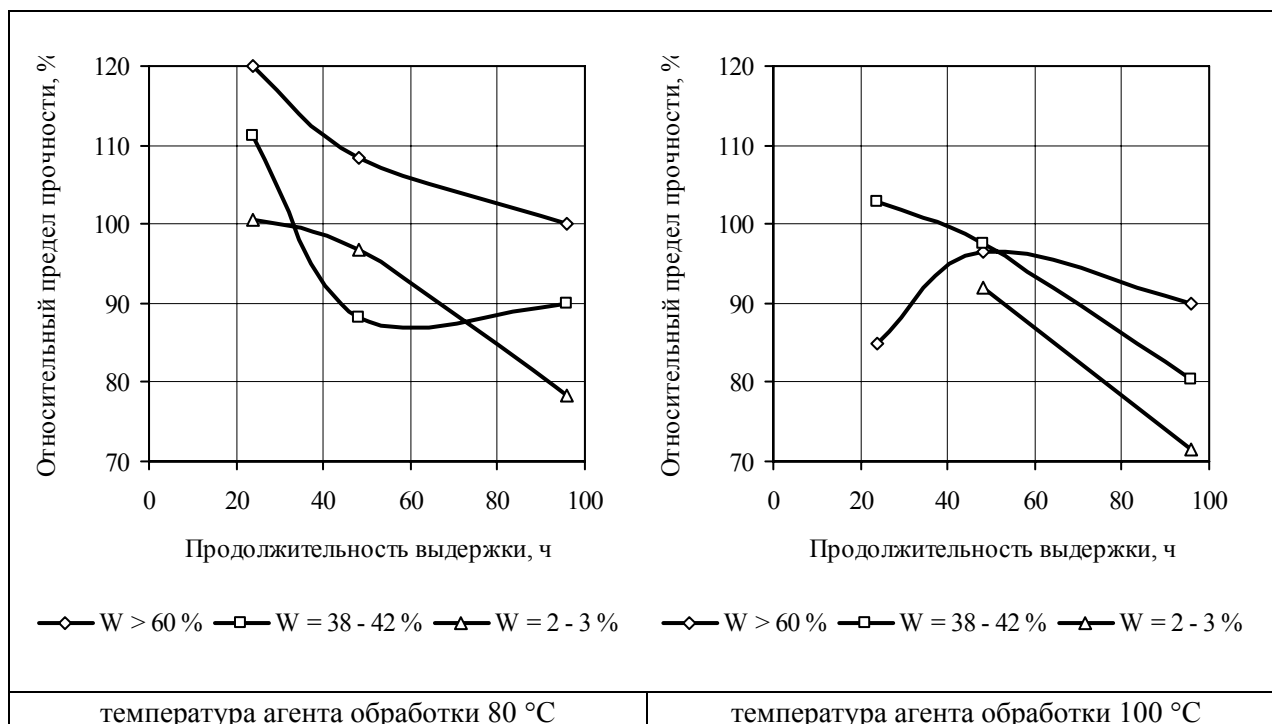


Рисунок 1.2 – Изменение предела прочности при скалывании вдоль волокон по радиальной плоскости

В другом опыте при тепловой обработке древесины влажностью от 38 до 42% при температуре 80 °C происходит снижение прочности при сжатии вдоль волокон от 118,9 до 100,3 %, а при температуре 100 °C прочность возрастает от 87 до 95 %. Имеются подобные расхождения результатов экспериментов и по другим видам испытаний.

Все же автор отмечает, что древесина лиственницы при температурном воздействии заметно теряет прочность при скалывании и ударном изгибе.

Работа Е. М. Зархиной, Л. Н. Кротова, В. Н. Ослоновича [7] посвящена изучению влияния высокотемпературной сушки, как на показатели прочности, так и на химический состав древесины лиственницы. Методика исследований предусматривала нахождение связи между снижением прочности древесины лиственницы и изменением её химического состава.

В результате исследований было установлено снижение показателей прочности для всех видов испытаний в начальный период сушки (примерно в течение первых суток), когда в древесине имеется свободная влага (рисунок 2).

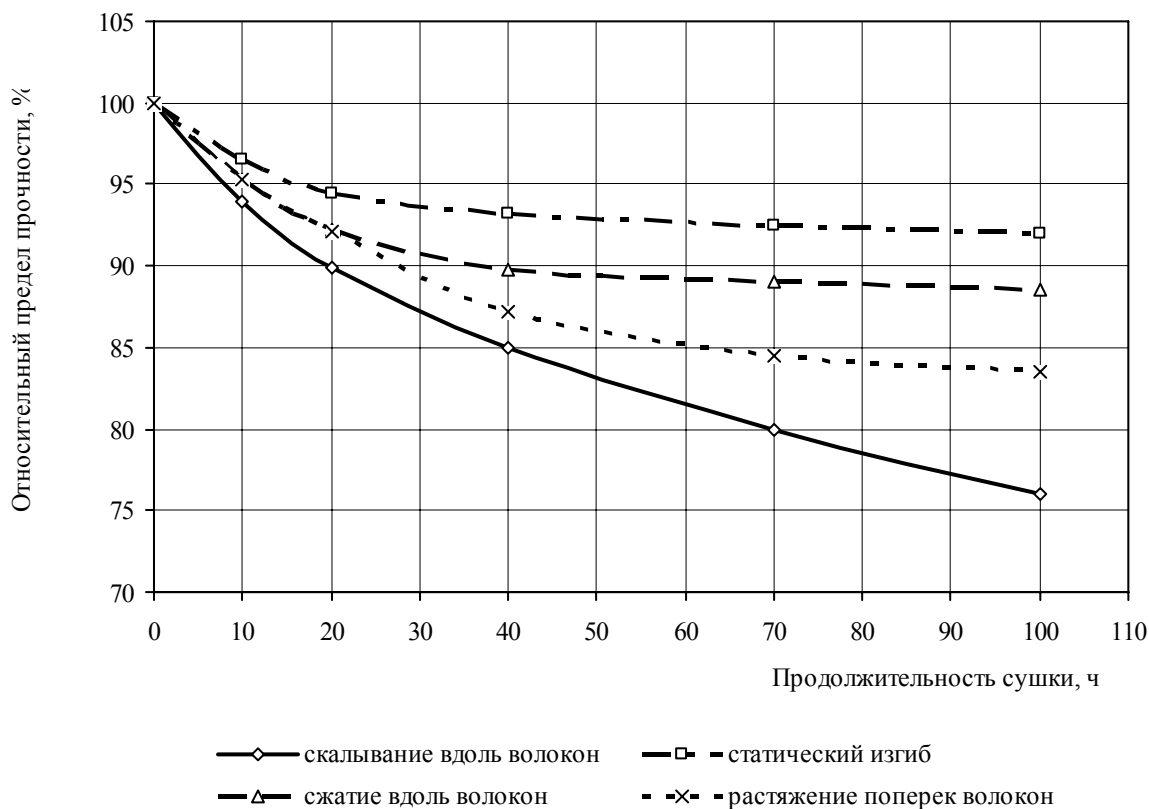


Рисунок 2 - Изменение прочности древесины лиственницы в процессе высокотемпературной сушки [4]

В дальнейшем снижение прочности замедляется.

Сравнение первоначального химического состава древесины (после атмосферной сушки) с составом древесины, подвергнутой высокотемпературной сушке, показало, что во всех случаях произошло количественное изменение компонентов, содержащихся в древесине (рисунок 3).

Отмечено снижение содержания основных компонентов, от которых зависят механические свойства древесины (пентозанов на 30,5 и целлюлозы на 12 %). Причем заметное изменение химического состава древесины наблюдается в центральных зонах доски, где продолжительное время сохраняется свободная влага.

В процессе сушки лиственница имеет ряд особенностей по характеру распределения влажности по толщине досок, присущих только этой породе. Влажность в центральной зоне доски длительное время остается постоянной, а кривые ее распределения по толщине сортамента обращены выпуклостью к центру [8]. В пиломатериалах других пород влажность в

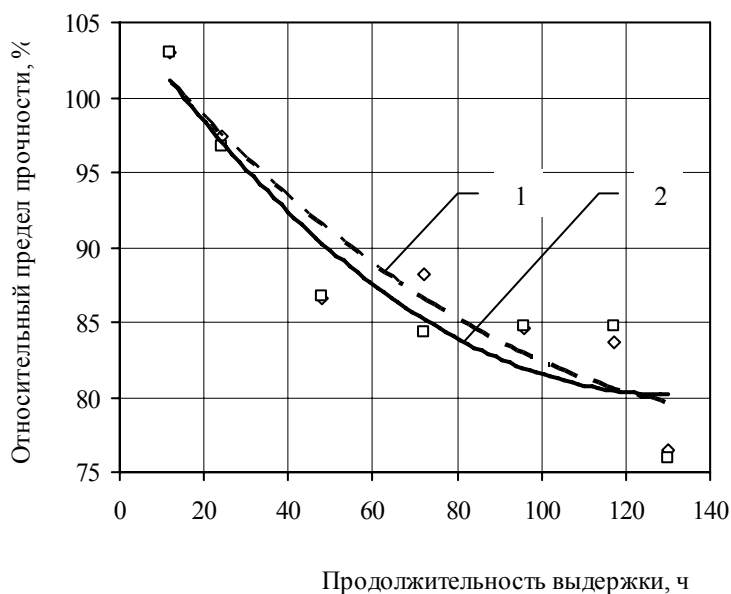
центре доски снижается на протяжении всего процесса сушки, а кривые монотонны и описываются параболой с показателем 2 и более.

Известно, что в процессе сушки разрушения микроструктуры древесины происходят в зоне действия растягивающих внутренних напряжений, то есть на первой стадии процесса в поверхностных слоях доски, а на конечной - внутри сортамента. Однако величина растягивающих внутренних напряжений в центральных слоях в 2 - 4 раза меньше, чем на поверхности. Следовательно, от воздействия внутренних напряжений сильнее снижается прочность поверхностных слоев. Но в центральной зоне доски, где длительное время сохраняется высокая влажность древесины, интенсивно идут гидролитические процессы.

В работе [9] проведены специальные исследования послойной прочности лиственничных пиломатериалов после камерной сушки. Результаты испытаний на сжатие вдоль волокон и статический изгиб показали относительную равномерность прочности древесины по толщине досок.

На основании полученных результатов был спланирован трехфакторный эксперимент, в котором исследовалось влияние температуры и продолжительности её воздействия при различной влажности древесины на степень снижения прочности материала. Реализация многофакторного эксперимента позволила получить

математическую модель снижения прочности древесины лиственницы на сжатие вдоль волокон в процессе сушки [10, 11].



1 – поверхностная зона доски; 2 – внутренняя зона

Рисунок 3 - Изменение содержания пентозанов в процессе высокотемпературной сушки [4]

На рисунке 4 приведены действительная температура агента сушки и прогнозируемая кривая снижения прочности древесины на сжатие вдоль волокон.

После механических испытаний партии образцов выдержанные при температуре 20 ÷ 25 °С, 80 и 100 °С, измельчали до опилок и проводили исследование химического состава древесины по стандартной методике.

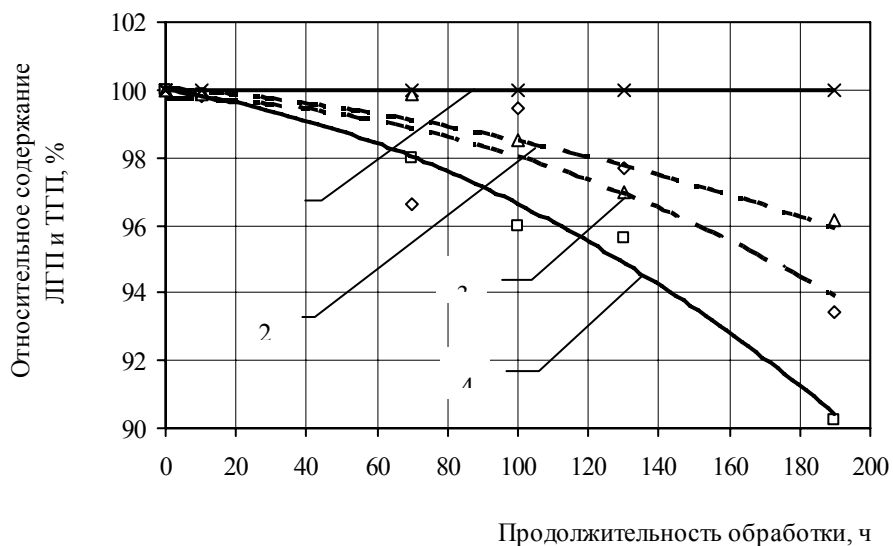
Результаты химического анализа древесины после теплового воздействия подтвердили ранее сделанные вывод [7]: при воздействии температуры на древесину с влажностью более 30 % происходят необратимые химические изменения компонентов клеточной стенки. Снижается содержание легко- и трудногидролизуемых

полисахаридов (ЛГП и ТГП рисунок 5) [12]. Изменение содержания трудногидролизуемых полисахаридов при температуре 100 °С объясняется тем, что в процессе гидролиза частично разрушается кристаллическая часть целлюлозы и появляется возможность доступа кислоты к гемицеллюлозам, находящимся в этой области.

Поскольку древесина лиственницы используется в производстве фанеры, большой практический интерес представляют результаты исследований влияния гидротермической обработки на качество лущеного шпона.



Рисунок 4 – Температура влажного воздуха и расчетная кривая снижения прочности древесины в процессе сушки



1 – ТГП, % при  $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 - ЛГП, % при  $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 3 – ТГП, % при  $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4 - ЛГП, % при  $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Рисунок 5 – Изменение содержания ЛГП и ТГП от массы сухой древесины лиственницы [12]

Влияние температуры прогрева древесины на качество лущеного шпона исследовали Н. Р. Теплова и Г. И. Орлов [13]. В качестве критерия качества шпона был принят предел прочности сырого шпона при растяжении поперек волокон. Температура воды, используемой для прогрева чураков перед лущением, составляла 30, 40, 60 и 80 °С. Термообработку заканчивали при

выравнивании температуры на поверхности чурака и в карандаше.

В результате обработки экспериментальных данных было установлено, что повышение температуры прогрева от 30 до 65 °С ведет к росту прочности шпона, что объясняется увеличением податливости древесины в зоне резания (рисунок 6).

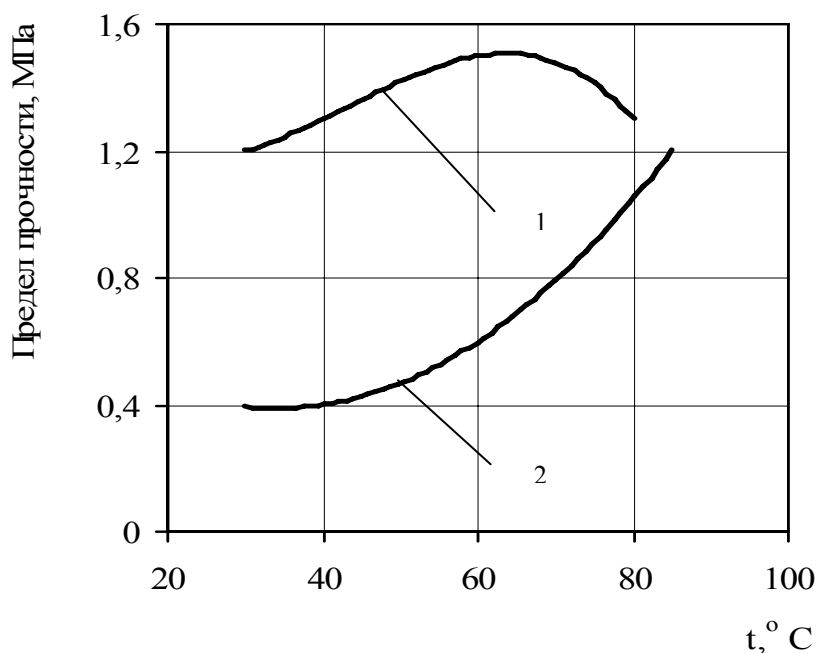


Рисунок 6 – Прочность шпона в зависимости от температуры прогрева древесины  
1 – сосна; 2 - лиственница

Приведенные авторами данные эксперимента согласуются с данными Н. В. Качалина [14] для строганого лиственничного шпона. Наибольшее значение предела прочности радиального строганого шпона достигается в результате прогрева материала до температуры около 70 °С, для тангенциального шпона прочность монотонно возрастала до 95 °С.

В работе [15] приведены данные о характере деформаций лиственничного шпона при горячем склеивании фанеры. Авторы отмечают, что величина деформации шпона зависит от его гидротермического состояния. При этом влажность шпона оказывает большее влияние на величину данного показателя, чем температура плит пресса: так, изменение влажности на 1 %, равнозначно изменению температуры на 3-5 °С.

Возможность улучшения качества строганого шпона из лиственницы прокатным способом отмечена в работе [16]. Приведенные авторами данные показывают, что при влажности 12-20 % лиственничный шпон имеет достаточную пластичность для исключения трещинообразования при обработке прокатным способом. При использовании шпона толщиной от 0,96 до 1,24 мм и величине обжима до 5 % на последней стадии обработки был получен

материал, не требующий дополнительной обработки в мебельных щитах.

Одним из направлений при прогнозировании свойств древесины является установление связи между химическим строением и прочностью. Способность древесины к деформациям в клеточных оболочках обусловлена повышенной эластичностью полимеров и других высокомолекулярных соединений, из которых состоит древесина [17].

В работах [18, 19] проведен анализ роли отдельных химических компонентов древесины в обеспечении механических функций.

При изучении химического состава ветвей было установлено, что в верхней части, которая работает на растяжение, целлюлоза имеет большую долю кристаллических областей. Повышенное содержание лигнина в древесине нижней части ветви, работающей на сжатие, объясняется физиологической необходимостью укрепления клеточных стенок. Автор указывает, что лигнинный комплекс имеет повышенную прочность при сжатии [19]. Пентозаны, по мнению Л.П. Жеребова, не являются случайной примесью: они несут вместе с целлюлозой механические функции, усиливая эластичность, гибкость и сопротивление разрыву соответствующих тканей древесины.

В результате анализа полученных данных автор делает вывод, что структура, связь и содержание основных химических компонентов древесины - целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз, определяют её механические свойства.

Влияние лигнина на прочность волокон ранней и поздней древесины лиственницы приведено в работе [20]. Авторы отмечают, что при уменьшении содержания лигнина наблюдается скачкообразное снижение разрывного усилия при разрыве волокон. Кроме того, при удалении лигнина наблюдается изменение размеров клеток древесины. Так, ранним трахеидам лиственницы присуще резкое скачкообразное уменьшение поперечного сечения. Поздние трахеиды несколько сужаются в течение первых 30 минут делигнификации, далее поперечное сечение остается практически неизменным.

М.И. Соснин в своей работе [21] приводит результаты исследований свойств древесины лиственницы методом свободных колебаний пластинки в широком диапазоне температур от 20 до 170 °С.

Характер полученных зависимостей автор связывает с тем, что древесина лиственницы в своем составе имеет до 20 % камеди, которая при наличии даже небольшого количества воды способствует пластификации древесины, и чем ниже температура, тем больше влияние влаги.

При более высокой влажности в области более высоких температур (около 120 °С и выше) наблюдается точка перегиба кривых модуля Юнга. Особенно это заметно при влажности древесины 25-30 % (рисунок 7). Наличие точки перегиба изменения модуля Юнга на кривых связано с тем, что при данных условиях часть компонентов древесины (гемицеллюлоза и лигнин) переходит из стеклообразного состояния в высокоэластическое или вынужденно эластическое.

По мнению авторов [22], снижение прочности древесины лиственницы может быть объяснено особенностями локализации компонентов клеточной стенки. По всей вероятности, наличие пектинов способствует тому, что участки на границе слоев клеточной стенки (P- S1, S1- S2) являются наиболее рыхлыми и наиболее слабыми. Именно по ним происходят разрывы в клеточной оболочке при различного рода

химических и физических воздействиях. В частично делигнифицированных образцах обнаруживается ламеллярное строение вторичной оболочки.

#### **Анализ обзорных данных**

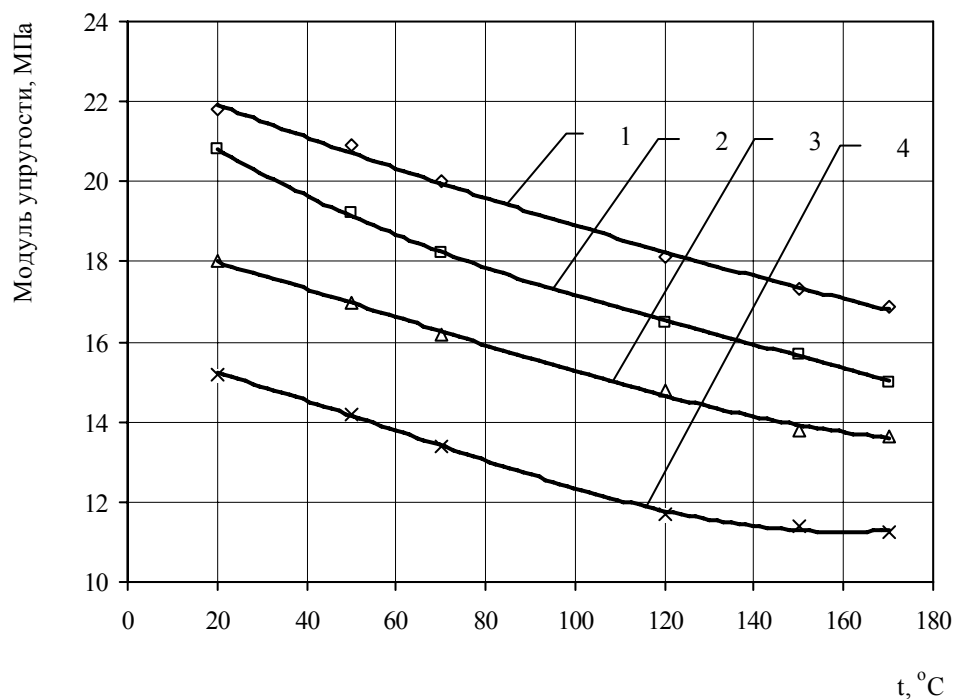
Гидротермическая обработка производится с целью пластификации древесины при получении шпона (пропаривание, проваривание) или для придания ей требуемой влажности. Продолжительность тепловой обработки может варьироваться от нескольких минут (сушка шпона), нескольких часов (ГТО перед лущением и строганием), до нескольких суток (сушка).

Наибольшее по продолжительности действие основных факторов, оказывающих влияние на свойства древесины, имеет место при ее сушке. В полостях клеток центральной зоны доски достаточно продолжительное время содержится водный раствор, который имеет слабокислую среду и создает благоприятные условия для гидролиза полисахаридов. Скорость реакции гидролиза полисахаридов увеличивается с повышением температуры.

Наиболее доступны гидролитической деструкции гемицеллюлозы, которые находятся в пространствах между целлюлозными фибриллами в аморфной части целлюлозы, а также сама её аморфная часть [12]. Гемицеллюлозы в клеточной стенке ориентируются параллельно целлюлозным фибриллам. Часть их оказывается устойчивой к мягкой окислительной деструкции, что объясняется тесным взаимопроникновением полисахаридов в сравнительно упорядоченные участки клеточных стенок в их природном состоянии. В случаях, когда гемицеллюлозы находятся в аморфной части целлюлозных фибрилл, они легко гидролизуются при действии кислот и переходят в простейшие сахара.

Изменение пористости холоцеллюлозы после осторожного удаления гемицеллюлоз указывает также и на их проникновение в сетку лигнина [22]. Это подтверждает существование связи между гемицеллюлозами и лигнином. Гемицеллюлозы ориентированы по молекулам целлюлозы, и их рассматривают как вещество, связывающее целлюлозу и лигнин на надмолекулярном уровне.





1 – W = 0 %; 2 – W = 6 %; 3 – W = 12 %; 4 – W = 25 %

Рисунок 7 – Изменение динамического модуля упругости при свободном колебании консольно заземленной пластинки в зависимости от температуры и влажности древесины

Одновременно с гидролизом полисахаридов при действии тех же катализаторов (кислот) идет процесс разрушения моносахаридов с образованием различных продуктов распада. Продуктами распада гексоз являются левулиновая и муравьиная кислоты и гуминовые вещества. Продуктами распада пентоз – фурфурол и муравьиная кислота, а также гуминовые вещества, появление которых является одним из факторов потемнения древесины при высоких температурах.

Одновременно с гидролизом полисахаридов происходит переход в раствор легкорастворимой части лигнинного комплекса, что способствует снижению прочности древесины [13].

Особое внимание следует уделять водорастворимой части экстрактивных веществ, которые при изменении влажности могут оказывать влияние на эластичность древесины лиственницы [14].

Снижение модуля упругости при нагревании древесины до температуры свыше 100 °C может быть объяснено переходом компонентов древесины в высокоэластическое состояние [1].

Изменение модуля упругости древесины в зависимости от гидротермического

состояния и методов ее обработки связано, очевидно, с изменением величины межмолекулярного взаимодействия. Изменение модуля упругости в течение времени при постоянной нагрузке связано с релаксационными процессами полимерных компонентов древесины [23].

#### Основные выводы по обзору

Проведенный обзор результатов исследований позволяет сделать следующие выводы:

- рассмотренные в обзоре исследования изменения физико-механических свойств древесины лиственницы при тепловом воздействии не в полной мере учитывали диапазон варьирования основных факторов. В основном опыты проводились при минимальной температуре 80 °C, хотя литературные данные показывают, что снижение прочности наблюдается уже при температуре выше 51 °C;

- результаты исследований трудно сопоставить между собой из-за существенных различий в методиках проведения опытов. В одних опытах исследовалось воздействие температуры на древесину при стабильной влажности, в других - образцы во время опытов

непрерывно высыхали. Также отличались вид и размеры образцов;

- исследователи схожи во мнении, что причиной снижения прочности древесины является гидролитическая и окислительная деструкция компонентов клеточной стенки;

- степень снижения прочности зависит от влажности древесины, температуры и продолжительности ее воздействия;

- потемнение и хрупкость древесины свидетельствует о произошедших необратимых химических реакций с выделением гуминовых веществ;

- воздействие температуры 60 °С на прочность древесины при любой влажности незначительно. Нагрев до температуры 80 °С заметно сказывается только на древесине с влажностью более 30 %. Существенное влияние на прочностные показатели древесины при любой влажности оказывает температура 100 °С.

#### **Библиографический список**

1. Бокшанин, Ю.Р. Обработка и применение древесины лиственницы.-М.: Лесн. пром-сть, 1982. -216 с.

2. Боровиков, А.М. Методика определения коэффициентов показателей механических свойств пиломатериалов // Состояние и перспективы сушки древесины. тез. докл. всесоюз. научн.-технич. совещ. Архангельск, 1985. - С. 59 - 64.

3. Качалин, В.Н. определение продолжительности выравнивания температуры ванчесов после нагревания их в автоклаве // Деревообраб. пром-сть. – 1971. – №6. – С. 4.

4. Качалин, Н.В. Изменение прочности древесины при нагревании в автоклавах // Деревообраб. пром-сть. – 1971. – № 8. – С. 9 – 10.

5. Дьяконов, К.Ф. Влияние гидротермической обработки на прочность древесины берёзы и лиственницы // Деревообраб. пром-сть. – 1967. - № 4 – С.9 – 12.

6. Дьяконов, К.Ф. Сохранение прочности древесины при камерной сушке//Сушка древесины: Тр. Всесоюз. Юбилейной научн.-техн. конф. – Архангельск, 1968. – С. 56 – 71.

7. Зархина, Е.М., Кротов, Л.Н., Ослонович, В.Н. Влияние высоких температур на механические свойства и химический состав древесины лиственницы//Лиственница. – Красноярск, 1968. – С.462 – 469.

8. Дзыга, Н.В. Сушка лиственничных пиломатериалов до эксплуатационной влажности в камерах непрерывного действия: автореф. дис...канд. тен. наук – Красноярск, 1989. – 19 с.

9. Орлов, А.А., Греб, Н.А. Исследование послышной прочности пиломатериалов. //Химико-лесной комплекс – проблемы и решения: научн.-практ. конф. сб. тез. докл. студентов и молодых ученых. – Красноярск: СибГТУ, 2001. – С. 380 - 382.

10. Орлов, А.А., Дзыга, Н.В., Огурцов, В.В. Снижение прочности древесины лиственницы в процессе сушки. //Вестник СибГТУ – Красноярск: СибГТУ, – 2001. – № 1. – С. 38 – 41.

11. Орлов, А.А. Сушка лиственничных пиломатериалов с заданными потребительскими свойствами в камерах периодического действия: автореф. дис...канд. тен. наук – Красноярск, 2001. – 19 с.

12. Греб, Н.А., Орлов, А.А., Еременко, О.Н., Дзыга, Н.В. Исследование изменения химического состава древесины лиственницы при гидротермической обработке. //Химико-лесной комплекс – проблемы и решения: сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск: СибГТУ, 2001. – С.248 – 250.

13. Теплова, Н.Р., Орлов, Г.И. О влиянии температуры прогрева древесины на качество лущеного шпона // Лиственница и комплексная переработка. Межвуз. сб. научн. тр. - Красноярск, СТИ, 1985.-С.56-61.

14. Качалин, Н.В. Исследование путей интенсификации процессов нагревания древесины в производстве строганого шпона: автореф. дис...канд. тен. наук – Л, 1969. – 21 с.

15. Орлов, Г.И., Анисов, П.П., Филиппович, А.А. Деформирование соснового и лиственничного шпона при моделировании краевой и срединной зон пакета при горячем склеивании // Лиственница и комплексная переработка: межвуз. сб. научн. тр.- Красноярск, СТИ, 1985.-С.61-65.

16. Чудинов, Б.С., Тюриков, Ф.Т., Зубань, П. Е. Древесина лиственницы и ее обработка.- М.: Лесн. пром-сть, 1965.- 144 с.

17. Ермолович, А.Г., Гненный, А.П. Калибрование декоративного строганого шпона лиственницы прокатным способом// Модифицирование и защитная обработка

древесины. Всесоюзн. научн.- практич. конф. Красноярск, 1989.- Том 2.- С. 58.

18. Древесина (химия, ультраструктура, реакции): Пер. с англ./ Фенгел Д., Вегенер Г.; Предисл. Леоновича А. А. // под ред. д-ра техн. наук проф. Леоновича А. А. – М.: Лесная пром-сть. - 1988. - 512 с.

19. Жеребов, Л.П. Механические функции химических ингредиентов древесины // Бумажная пром-сть. – 1946. - № 6.

20. Бывшев, АВ., Левшина, В.В., Савицкий, Е. Е. Изменение прочности волокон ранней и поздней древесины сосны и лиственницы при делигнификации // Лиственница и комплексная переработка. Межвуз. сб. научн. тр.- Красноярск, СТИ, 1985. - С.120 - 124.

21. Соснин, М.И. Исследование свойств древесины лиственницы методом свободных

колебаний пластинки // Лиственница (проблемы комплексной переработки): межвуз. сб. научн. трудов.- Красноярск, СТИ, 1983. - С.85 – 88.

22. Москалева, В.Е., Брянцева, З.Е. Некоторые данные об ультраструктуре клеточной стенки древесины лиственницы // Исследование древесины и материалов на ее основе: сб. тр. института леса и древесины им. В. Н. Сукачва. Красноярск, 1971. - С. 5 - 15.

23. Хухрянский, П.Н. Прочность древесины. – М.: Гослесбумиздат, - 1955. - 151 с.

24. Вардугин, В.А, Брюховецкая, Т.М. Определение модуля упругости при чистом изгибе // Материалы конф. по итогам НИР факультета механич. технолог. др.- Красноярск, СТИ, 1971. - С.71 - 75.

