

**УПРУГИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВЕСИНЫ
ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ И ВЛИЯНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Стородубцева Т. Н., доц., д.т.н., Томилин М. А., студ., Рудько Е. В., студ.
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова
(Воронеж, Россия), e-mail: tamara-tns@yandex.ru

**ELASTIC AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF WOOD
AT VARIOUS HUMIDITY AND TEMPERATURE INFLUENCES**

Storodubtseva T. N., D.Sc., Assoc. Prof., Tomilin M. A., stud., Rudko E. V., stud.
Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov
(Voronezh, Russia)

Аннотация. Целью исследований, результаты которых представлены в данной работе и обобщенных данных, являлось уточнение основных постоянных упругости сосны, произрастающей в лесничестве г. Воронежа, т.к. крайне разноречивые данные по этим характеристикам не позволяли использовать их при анализе напряженных состояний, возникающих в древесностекловолокнистом композиционном материале под воздействием различных физических факторов. Рассмотрена древесина в виде щепы или необработанных досок из тонкомера или горбыля, используемая в качестве армирующего заполнителя разработанного древесностекловолокнистого композиционного материала. Приведенные отношения коэффициентов Пуассона к соответствующим модулям упругости древесины сосны при растяжении и сжатии показали, что эти отношения равны или близки между собой, а при точном соблюдении правил выпиливания образцов в соответствии с плоскостями упругой симметрии и использовании стволов одной конкретной вырубki, можно считать древесину сосны действительно ортотропным телом и использовать полученные отношения в обобщенном законе Р. Гука. Полимерные отвержденные растворы так же, как и древесина, склонны к набуханию, при этом в композиционном материале возникают влажностные напряжения, т.е. полимерная оболочка нуждается в защите от действия воды, заметное понижение механических свойств наблюдается при воздействии знакопеременных температур.

Ключевые слова: древесина; упругие постоянные; композиционный материал; влажность

Abstract. The aim of the research, the results of which are presented in this paper and generalized data, was to clarify the main constants of elasticity of pine growing in the forestry of Voronezh, because extremely contradictory data on these characteristics did not allow their use in the analysis of stress states arising in a fiberglass composite material under the influence of various physical factors. Wood in the form of wood chips or untreated boards made of thin gauge or slab is considered, used as a reinforcing aggregate of the developed wood-fiber composite material. The above ratios of Poisson's ratios to the corresponding moduli of elasticity of pine wood under tension and compression showed that these ratios are equal or close to each other, and if the rules for sawing samples are strictly observed in accordance with the planes of elastic symmetry and using trunks of one particular felling, we can consider pine wood an orthotropic body and use the obtained relations in the generalized law of R. Hooke. Polymer cured solutions, like wood, are prone to swelling, and moisture stresses appear in the composite material, i.e. the polymer shell needs protection from the action of water, a noticeable decrease in mechanical properties is observed when exposed to alternating temperatures.

Key words: wood; elastic constants; composite material; humidity

Введение. Значения модулей упругости и коэффициентов С. Пуассона определялись целым рядом ведущих в области древесиноведения учеными – Н.Л. Леонтьевым, Л.М. Перелыгиным, Б.Н. Уголевым, А.М. Боровиковым, Е.К. Ашкенази и др. [1-6]. Полученные ими характеристики внесены в руководящие документы, однако ни данные отдельных авторов, ни их средние значения не доказывают, что древесине, в частности сосне, можно приписать свойства ортогональной анизотропии.

Материалы и методы. В условиях кратковременного воздействия сравнительно небольших нагрузок древесина ведет себя как упругое тело. Для него модуль упругости является показателем жесткости, т.е. способности упруго деформироваться, и представляет собой коэффициент пропорциональности в законе Р. Гука при сжатии, например, или растяжении. Для этих видов нагружения нами были определены модули упругости древесины (E_a , E_r и E_t), т.е. по направлениям нормалей «а», «r» и «t» к главным плоскостям упругой симметрии, характеризующим анизотропию ее свойств.

Отправной точкой при изучении поведения древесины – армирующего заполнителя древесностекловолоконистого композиционного материала, явилось изучение по литературным источникам и подсчет по предложенным в них формулам ее упругих и прочностных характеристик при комнатной влажности ($W = 12-15\%$) и влажности, соответствующей пределу гигроскопичности, т.е. при $W = 30\%$, когда падение значений названных характеристик стабилизируется (таблицы 1–3) [1–6].

Таблица 1 – Модули упругости древесины сосны при влажности 12...15 %, МПа·10⁻⁴

Источник информации	Вид деформации								
	Растяжение			Сжатие			Сдвиг		
	E_a	E_r	E_t	E_a	E_r	E_t	G_{ra}	G_{ta}	G_{rt}
1. Леонтьев Н.Л., с.103 [1]	1.29	0.045	0.042	1.31	0.066	0.039	0.114	0.071	0.005
Там же, с. 116	1.17	0.051	0.043	1.17	0.062	0.050	0.114	0.071	0.005
Там же, с. 36, 37	1.05/ 1.06	0.042/ 0.043	0.038/ 0.042	1.07/ 1.09	0.062/ 0.067	0.031/ 0.038	0.109/ 0.114	0.084/ 0.091	0.0045/ 0.005
2. Перелыгин Л.М., с. 117 [2]	1.17	0.062	0.050	1.17	0.051	0.043	0.114	0.071	0.065
3. Руководящие технические материалы, [3]	1.34	0.054	0.047	1.42	0.077	0.055	0.123	0.076	0.005
4. Уголев Б.Н., с.186, с.189 [4]	1.23	0.059	0.051	1.23	0.070	0.058	0.123	0.080	0.005
5. Боровиков А.М., Уголев Б.Н., с. 258 [5]	1.19	0.054	0.047	1.19	0.067	0.055	0.123	0.076	0.005
6. Ашкенази Е.К., с.182, [6]	1.17	0.051	0.043	1.17	0.062	0.050	0.114	0.071	0.005
Миним. знач.	1.05	0.042	0.038	1.07	0.051	0.031	0.109	0.071	0.0045
Макс. знач.	1.34	0.062	0.051	1.42	0.077	0.058	0.123	0.091	0.0050
Средн. знач.	1.20	0.052	0.045	1.25	0.064	0.045	0.116	0.081	0.0048

Таблица 2 – Коэффициенты поперечной деформации древесины при влажности 12–15 %

Источник информации	μ_{ra}	μ_{ar}	μ_{ta}	μ_{at}	μ_{tr}	μ_{rt}
1. Леонтьев Н.Л., с.110-111 [1]	0.42	0.03	0.025	0.030	0.085	0.062
Там же, табл. 47, с. 117 [1]	0.49	0.03	0.41	0.037	0.79	0.38
Там же, с.110 [1]	0.10-0.83	0.01-0.09	0.11-0.67	0.01-0.09	0.47-1.25	0.10-0.90
2. Перелыгин Л.М., с. 179 (ссылка на Н.Л. Леонтьева) [1]	0.49	0.03	0.41	0.037	0.79	0.38
3. Руководящие технические материалы, табл. 9, [3]	0.49	0.03	0.41	0.037	0.79	0.38
4. Уголев Б.Н., с. 187 [4]	0.49	0.03	0.41	0.037	0.79	0.38
5. Боровиков А.М., Уголев Б.Н., с. 176 [4]	0.504	0.078	0.465	0.045	0.527	0.306
То же, с. 258 [4]	0.49	0.03	0.041	0.037	0.79	0.38
6. Ашкенази Е.К., с.182 [6]	0.490	0.03	0.41	0.037	0.79	0.38
Минимальные значения	0.10	0.01	0.11	0.01	0.47	0.10
Максимальные значения	0.83	0.09	0.67	0.09	1.25	0.90
Среднее значение	0.47	0.05	0.39	0.05	0.86	0.50

Таблица 3 – Пределы прочности древесины сосны при влажности 12–15 %, МПа

Источник информации	Растяжение			Сжатие, смятие			Скалывание	
	Вдоль волокон	Радиальн.	Тангенциальн.	Вдоль волокон	Радиальн.	Тангенциальн.	Радиальн.	Тангенциальн.
1. Леонтьев Н.Л. [1], с. 153-168	101.0	5.2	3.3	41.5	3.4	5.1	6.3	6.7
2. Перелыгин Л.М. [2], с. 153-168	101.0	5.2	-	41.5	3.4	5.1	6.9	6.7
3. Руководящие технические материалы [3]	101.8	-	-	45.4	-	-	7.4	7.2
4. Уголев Б.Н. [4 2], с. 168	103.0	-	-	48.5	5.2	7,6	7.5	7.3
5. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. [5], с. 216	103.0-102.0	-	-	46.3-48.0	-	-	7.44-7.55	7.23-7.55
Средн. знач.	102.0	5.2	3.3	45.0	4.0	5.9	7.2	7.1

Результаты. Таким образом, показано, что при точном соблюдении правил выпиливания образцов в соответствии с плоскостями упругой симметрии и использовании стволов одной конкретной вырубki, можно считать древесину сосны действительно ортотропным телом и использовать полученные отношения в обобщенном законе Р. Гука.

Значения модулей сдвига древесины сосны определялись выборочно по ГОСТ, т.к. они, судя по научным публикациям, достаточно стабильны: $G_{ra}=0,114 \cdot 10^4$ МПа, $G_{tr}=0,005 \cdot 10^4$ МПа, $G_{ta}=0,07 \cdot 10^4$ МПа.

Обсуждение. Исследования Н.Н. Чулицкого [7], проведенные с древесиной сосны в абсолютно сухом состоянии, показали, что под действием температуры 80–100 °С в течение 16 суток предел прочности при сжатии вдоль волокон снижается на 5–10%, а удельная работа при ударном изгибе на 15–30%. Снижение происходит, главным образом в течение первых 2–4 суток действия высокой температуры. Влияние повышенной температуры менее всего сказывается на прочности при растяжении вдоль волокон: при повышении температуры с 10 до 100 °С прочность при растяжении снижается примерно на 16%, а при сжатии вдоль волокон – более чем вдвое. Прочность при статическом изгибе также сильно снижается при высокой температуре.

Н.Л. Леонтьев [1] изучал влияние температуры от 20 до 100 °С на прочность при сжатии вдоль и поперек волокон и модуль упругости при влажности древесины от 0 до 100 %. Нагревалась древесина токами высокой частоты. Полученные данные о прочности при сжатии вдоль и поперек волокон приведены в таблица 4.

Таблица 4 – Предел прочности и условный предел прочности при сжатии вдоль и поперек волокон

Свойства	Температура, °С	Прочность при сжатии древесины, МПа, при влажности древесины, %				
		0	15	30	50	100
Предел прочности при сжатии вдоль волокон	20	74,0	35,4	20,1	20,0	20,0
	50	73,2	23,9	12,5	12,7	12,0
	100	64,4	11,4	6,3	6,0	7,3
Условный предел прочности при сжатии поперек волокон	20	3.7*/7.7	2.3/4.1	1.5/2.2	1.3/2.1	1.2/2.0
	50	2.5/5.4	1.7/2.8	1.2/1.3	1.3/1.4	1.1/1.4
	100	2.3/5.0	1.5/1.7	0.8/0.8	0.6/0.7	0.6/0.7

*) В числителе приведены данные при радиальном сжатии, в знаменателе – при тангенциальном.

Данные таблицы 4 показывают, что прочность при сжатии вдоль и поперек волокон понижается как с повышением температуры, так и с повышением влажности древесины, при этом одновременное действие обоих факторов вызывает большое снижение прочности по сравнению с действием одного из них. Влияние влажности наблюдается до предела гигроскопичности, а дальнейшее увеличение влажности практически не отражается на прочности. Влияние же температуры непрерывно на исследованном диапазоне ее изменения.

Влияние повышенной температуры при разной влажности на прочность древесины при растяжении поперек волокон изучал М.М. Чернецов, по данным которого Л.М. Перельгиным [2] составлена табл. 5. Как видно, в этих исследованиях прочности при растяжении поперек волокон, а также в проведенных позднее исследованиях сосны М.Д. Бывших, П.С. Серговский, В.О. Самуйло и В.Н. Быковский, на которых ссылается Л.М. Перельгин [2, с. 208], проявляются такие же закономерности, как и при сжатии.

Совместное влияние температуры и влажности существенно отражается на реологических показателях при растяжении и сжатии в тангенциальном направлении поперек волокон древесины основных пород. Так, для березы при увеличении влажности от 10% до $W_{пл.}$ мгновенный модуль упругости снижается в 4 раза, а при температуре 95° – в 8 раз; длительный модуль упругости снижается соответственно в 5 и 7 раз, время релаксации – в 4 раза.

Таблица 5 – Влияние повышенной температуры при разной влажности на прочность древесины при растяжении поперек волокон [2]

Порода	Температура, °С	Предел прочности, МПа, при растяжении					
		Радиальном и влажности древесины, %			Тангенциальном и влажности древесины, %		
		15	25	50	15	25	50
Сосна	20	5,0	4,0	3,2	3,2	2,5	5,0
	40	4,5	2,8	2,7	2,7	2,1	2,9
	80	3,5	2,4	2,3	2,3	1,4	1,2

А.В. Шуклин [2, с. 210] изучал воздействие на механические свойства древесины сосны и дуба циклических изменений температуры в разных вариантах (в диапазоне от +60 до –30 °С) при разной влажности древесины (0,12 и 23%) и при различном числе циклов (40; 80 и 120). Результаты испытаний показали, что с увеличением числа циклов механические свойства древесины понижаются при всех вариантах температуры и при всех градациях влажности.

Особенно заметно снижается прочность после первых 40 циклов, затем снижение прочности замедляется. Наиболее заметное понижение механических свойств наблюдается при воздействии знакопеременных температур (при варианте: нагрев с 20 до 60 °С, выдержка 10 мин; охлаждение до –30 °С; выдержка 10 мин, нагрев до +20 °С), а из исследованных механических свойств больше понижается удельная работа при ударном изгибе и условный предел прочности при сжатии поперек волокон, затем прочность при сжатии и скалывании вдоль волокон.

В результате диффузии молекулы воды проникают в объем полимерного материала между звеньями его молекул и, заполняя свободные промежутки, раздвигают эти звенья, а затем молекулы и надмолекулярные агрегаты, увеличивая расстояния между ними. Таким образом, увеличивается объем набухающего полимера и его масса. Процесс набухания прекращается после полного заполнения межмолекулярного пространства водой [8–11].

Вода вызывает набухание связующего и заполнителей полимерной матрицы древесностекловолоконистого композиционного материала, в результате чего могут возникать значительные напряжения, под действием которых появляются трещины, способствующие дальнейшему разрушению элемента конструкции в целом [12–14]. Деструкция и изменение свойств возникают от действия различных зимических водных растворов и воды. Следовательно, универсальной характеристикой стойкости является сопротивление действию воды [13, 15].

Заключение. Таким образом, показано, что при точном соблюдении правил выпиливания образцов в соответствии с плоскостями упругой симметрии и использовании стволов одной конкретной вырубki, можно считать древесину сосны действительно ортотропным телом и использовать полученные отношения в обобщенном законе Р. Гука.

Поскольку вода диффундирует с небольшой скоростью и неравномерно распределяется по толщине материала, в нем возникают напряжения даже в том случае, если деформация не ограничивается жесткими внешними связями. Наружные набухшие слои материала стремятся расширяться и тянут за собой внутренние «сухие» слои, которые сопротивляются этому растяжению, ограничивая деформацию растяжения [12, 15].

В связи с этим по сечению, перпендикулярному фронту диффундирующей жидкости, в материале возникают влажностные напряжения, неодинаковые по величине и знаку. Набухшие внешние слои окажутся сжатыми, а внутренние – растянутыми. Эпюры распределения влажностных напряжений меняются во времени, т. к. из-за пластифицирующего действия воды, меняется модуль упругости отвержденного полимерного раствора [11, 16].

Процесс водонасыщения объясняется им следующим образом: она может проникать в композиционный материал по капиллярам как между полимерсвязующим веще-

ством и нитевидной стеклоарматурой, так и по самой арматуре. В этом случае адгезионные связи различного вида должны ослабевать, что и приводит к снижению характеристик прочности и, в особенности, жесткости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонтьев, Н. Л. Упругие деформации древесины / Н. Л. Леонтьев. – Л.: Гослесбумиздат, 1952.– 120 с.
2. Перельгин, Л. М. Древесиноведение / Л. М. Перельгин. – М. : Лесн. пром-сть, 1969.– 316 с.
3. Древесина, показатели физико-механических свойств.: Рук. техн. материалы / Ком. стандартов, мер и измерит. приборов – М.: Стандартгиз, 1962.– 74 с.
4. Уголев, Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения / Б. Н. Уголев, А. М. Боровиков. – М. : Лесн. пром-сть, 1986. – 368 с.
5. Боровиков, А. М. Справочник по древесине / А. М. Боровиков, Б. Н. Уголев / Под ред. Б. Н. Уголева.– М.: Лесн. пром-сть, 1989.– 236 с.
6. Ашкенази, Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази.– М.: Лесн. пром-сть, 1978.– 224 с.
7. Чулицкий, Н. Н. Исследование факторов характеристик режимов сушки древесины / Н. Н. Чулицкий // Тр./ ВИАМ.– М.: ВИАМ, 1934.– Вып. 13.– 164 с.
8. Харчевников, В.И. Водостойкий композиционный материал на основе отходов лесного комплекса для железнодорожных шпал / В.И. Харчевников, Т.Н. Стородубцева // Известия высших учебных заведений. Строительство. - 2002. - № 12. - С. 74-78.
9. Соломатов, В. И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов, В. П. Селяев. – М. : Стройиздат, 1987. – 264 с.
10. Стородубцева, Т. Н. Исследование влияния свойств древесного заполнителя на трещиностойкость композиционного материала / Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный // Лесотехнический журнал. - 2014. - Т. 4, № 3 (15). - С. 213-220.
11. Дунаев, В.Ф. Об изменчивости модуля упругости и предела прочности древесины в технологическом цикле / Дунаев В.Ф. // Лесной журнал. – Архангельск, 2014. - № 3. - С. 106-112.
12. Стородубцева, Т.Н. Строительные древесностекловолокнистые композиционные материалы для изделий специального назначения : автореф. ... д-ра. техн. наук : 05.23.05 / Т.Н. Стородубцева ; ВГАСУ. - Воронеж, 2005. - 42 с.
13. Бухонов, Ю. Н. Сопротивляемость и деформативность композиционного материала на основе древесины при изгибе : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. Н. Бухонов. – Воронеж, 1998. – 20 с.
14. Стородубцева, Т. Н. Использование древесных отходов и местного техногенного сырья в составах композитов : монография / Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный; М-во образования и науки Рос. Федерации, Фед. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г. Ф. Морозова". - Воронеж, 2016. - 196 с.
15. Общий курс строительных материалов : учеб. пособие для строит. спец. вузов / И. А. Рыбьев, Т. И. Арефьева [и др.] : под ред. И. А. Рыбьева. – М. : Высш. шк., 1987. – 584 с.
16. Стородубцева, Т. Н. Результаты исследования прочностных характеристик древесных композиционных материалов: деп. рукопись / Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный; М-во образования и науки Рос. Федерации, Фед. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования "Воронеж. гос. лесотехн. акад.". - Воронеж, 2014. - 33 с.