

УДК 630\*

© **В.Ф. Дунаев, канд. техн. наук**

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002  
E-mail:javzora@mail.ru

### **ОБ ИЗМЕНЧИВОСТИ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ**

Изложен процесс выделения каждого из распределений механических свойств, рассчитаны интегральные распределения предела прочности древесины в лесосеке и в пиломатериалах.

Установлена неизвестная ранее закономерность распределения модуля упругости и предела прочности в виде суммы четырех нормальных распределений со своими средними арифметическими и оценками средних квадратических. Первоначальные, природные распределения модуля упругости и предела прочности древесины хлыстов неуклонно ухудшались при длительном хранении сырья в штабелях на нижних складах, лесопильных предприятиях в зимних запасах, в межоперационных запасах после размерной сортировки бревен, в сушильных штабелях и штабелях готовой продукции. Отбор образцов выполнен на участке формирования длины пиломатериалов, поэтому информация о механических свойствах образцов накапливалась полностью.

При наличии теоретической базы неразрушающего контроля показателей механических свойств появилась возможность сортирования пиломатериалов по группам прочности и рационального использования древесины в конструкциях с гарантированной долговечностью.

*Ключевые слова:* модуль упругости, предел прочности, эквивалентное время нагружения, лесосека, пакет пиломатериалов, закон нормального распределения, среднее арифметическое, оценка среднего квадратического отклонения.

Современная компьютерная техника позволяет точнее и глубже анализировать результаты статистических исследований. Например, для анализа статистических характеристик – модуля упругости и предела прочности – используются их графическое представление в виде гистограмм и нормальный закон распределения [4], с помощью которого вычисляются генеральное среднее арифметическое значение модуля упругости при статическом изгибе, среднее квадратическое отклонение отдельных значений от генерального среднего арифметического.

Для оценки допустимости асимметрии и эксцесса опытного распределения вычисляются показатели асимметрии и эксцесса и их ошибки. Если асимметрия и эксцесс распределения экспериментальных значений модуля упругости при статическом изгибе допустимы, то само распределение считается подчиняющимся закону нормального распределения.

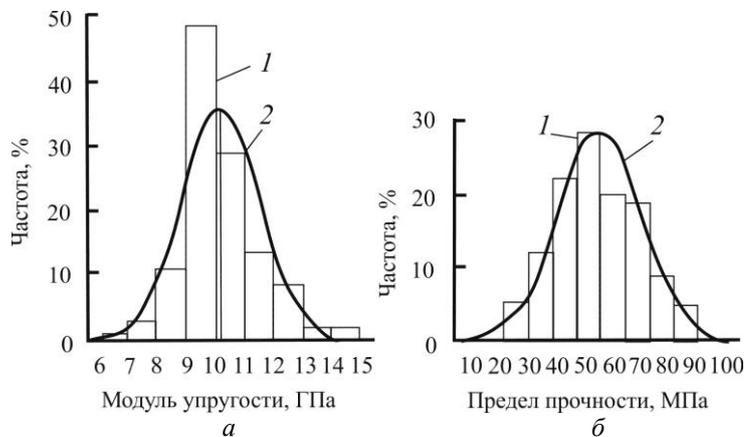


Рис. 1. Гистограммы (1) и кривые нормального распределения (2) модуля упругости (а) и предела прочности (б) древесины при статическом изгибе

На рис. 1 приведено нормальное распределение модулей упругости и предела прочности древесины сосны при статическом изгибе [4].

По оценке Ю.С. Соболева [4], генеральное среднее арифметическое значение модуля упругости при статическом изгибе  $M = 10,17$  ГПа; среднее квадратическое отклонение отдельных значений от генерального среднего арифметического  $\bar{\sigma} = 1,35$  ГПа; асимметрия распределения  $A = 0,564$ , эксцесс распределения  $E = 1$ ; ошибка асимметрии  $m_A = 0,224$  и эксцесса  $m_E = 0,448$ ; отношения  $A/m_A = 2,520 < 3$  и  $E/m_E = 2,240 < 3$ . Асимметрию и эксцесс распределения экспериментальных значений модуля упругости при статическом изгибе автор [4] считает небольшими и находящимися в пределах допустимых значений, а само распределение – подчиняющимся нормальному закону.

Среднее арифметическое генеральной совокупности вариантов предела прочности  $M = 59,5$  МПа, среднее квадратическое отклонение отдельных значений от генеральной средней арифметической  $\bar{\sigma} = 16,75$  МПа. При анализе предела прочности получено:  $A = 0,151$ ;  $E = -0,717$ ;  $m_A = 0,224$  и  $m_E = -0,448$ ;  $A/m_A = 0,674 < 3$  и  $E/m_E = 1,670 < 3$ . Асимметрию и эксцесс автор [4] считает небольшими и находящимися в пределах допустимых значений, поэтому распределение результатов опытных измерений пределов прочности подчиняется нормальному закону.

В связи с тем, что кривые нормального распределения слабо контактируют с гистограммами, возникает предположение о наличии в экспериментальных данных нескольких распределений, обусловленных длительностью и многооперационностью технологических процессов лесопромышленного комплекса.

Оцифруем гистограммы, приведенные на рис. 1, и представим графики в виде ломаных линий (рис. 2), которые рассмотрим как сумму нескольких распределений, подчиняющихся нормальному распределению (рис. 3).

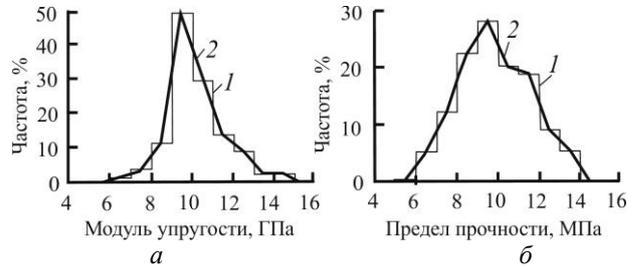


Рис. 2. Оцифрованные гистограммы (1) и ломаные линии (2), соединяющие средние точки участков соответствующих гистограмм модуля упругости (а) и предела прочности (б), без кривых нормального распределения

Для выделения слагаемых этой суммы сделаем несколько последовательных шагов.

*Первый шаг.* Выделим наиболее вероятное (с большей частотой) распределение и, совместив графики теоретического нормального распределения с экспериментальным, определим параметр этого распределения, обозначив его  $k_1$  (рис. 3, а).

*Второй шаг.* Исключим из экспериментальных данных значения, соответствующие распределению  $k_1$  (рис. 3, б). Затем, выделив экспериментальные значения с наибольшей частотой, подберем к полученным результатам еще одно нормальное распределение  $k_2$  и определим его параметры.

*Третий шаг.* Исключим распределение  $k_2$  из первого остатка (рис. 3, в). Второй остаток имеет два явно выраженных распределения, не связанных между собой. Определим параметры нормальных распределений  $k_3$  и  $k_4$  для этих участков.

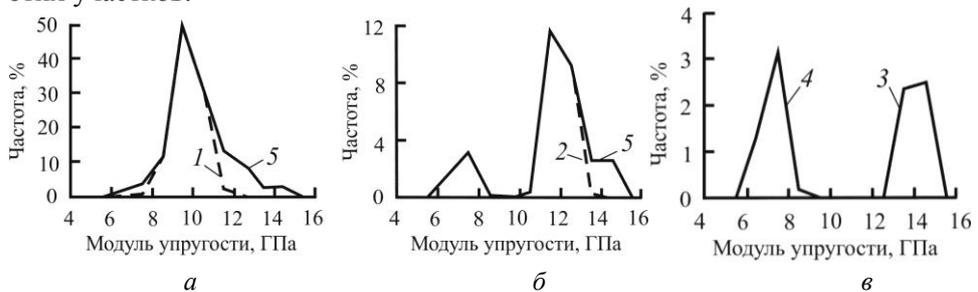


Рис. 3. Последовательное выделение (по наибольшей частоте встречаемости) групп образцов, модули упругости которых описываются нормальными законами распределения: а – наиболее вероятное распределение  $k(1)$  с параметрами  $E_1 = 9,24$  ГПа,  $s_1 = 0,71$  ГПа,  $F_1 = 92,50$ ; б – наиболее вероятное из первого остатка распределение  $k(2)$  с параметрами  $E_2 = 11,94$  ГПа,  $s_2 = 0,51$  ГПа,  $F_2 = 21,38$ ; в – распределения из второго остатка  $k(3)$  и  $k(4)$  соответственно с параметрами  $E_3 = 14,01$  ГПа,  $s_3 = 0,45$  ГПа,  $F_3 = 5,05$  и  $E_4 = 7,25$  ГПа,  $s_4 = 0,53$  ГПа,  $F_4 = 4,60$ ; 5 – исходное распределение модуля упругости

*Четвертый шаг.* Вычтем из второго остатка значения распределений  $k_3$  и  $k_4$ . Частота остатка от экспериментальных данных не превышает 0,1. Поэтому процесс выделения нормальных распределений можно прекратить.

Введем следующие обозначения:

$E_1, E_2, E_3, E_4$  – среднее арифметическое модулей упругости в группах;

$s_1, s_2, s_3, s_4$  – среднее квадратическое модулей упругости в группах;

$F_1, F_2, F_3, F_4$  – частота среднего арифметического модулей упругости в группах;

$F_{mi}$  – экспериментальное значение частоты модуля упругости.

Итак, вместо одного нормального закона распределения модуля упругости древесины сосны следует рассматривать сумму четырех нормальных законов.

Рассчитаем долю каждой группы образцов с разными параметрами распределения: доля группы  $k_1 = 0,748$ ;  $k_2 = 0,173$ ;  $k_3 = 0,041$ ;  $k_4 = 0,039$ .

У третьей группы наибольшее значение среднего арифметического модуля упругости, но доля ее очень мала ( $k_3 = 0,041$ ).

В природных условиях вся древесина имела свойства, характерные для этой группы. В процессе заготовки, транспортировки и переработки под действием длительных внешних механических нагрузок, а также внутренних напряжений и деформаций свойства древесины могли только уменьшаться. Неоднократные процедуры погрузки–транспортирования–разгрузки и длительного хранения в штабелях приводят к снижению среднего арифметического и даже образованию новых групп:  $E_3 = 14,01$  ГПа;  $E_2 = 11,94$  ГПа;  $E_1 = 9,74$  ГПа;  $E_4 = 6,75$  ГПа.

В работе [3] показано, что уменьшение  $E$  однозначно связано с длительностью пребывания материала под нагрузкой следующим уравнением:

$$E_i = E_0 \cdot e^{-c \cdot t_{mi}}, \quad (1)$$

где  $E_i$  – модуль упругости материала, подвергавшегося нагружению,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;

$E_0$  – модуль упругости материала, не подвергавшегося нагружению (в нашем случае  $E_0 = E_3 + 3 \cdot s_3 = 15,04$  ГПа);

$c$  – коэффициент разрушения, для древесины сосны  $c = 0,02$ /дн.

$t_{mi}$  – эквивалентное время пребывания материала, в течение которого модуль упругости уменьшился от  $E_0$  до  $E_i$ .

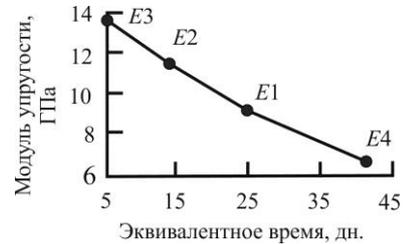
Решив уравнение (1) относительно  $t_{mi}$  можно вычислить и эквивалентное время пребывания материала под нагрузкой:

$$t_{mi} = 1/0,02 \ln(E_0/E_i); \quad (2)$$

где  $t_{m1} = 5,36$  дн.-экв.;  $t_{m2} = 13,72$  дн.-экв.;  $t_{m3} = 24,36$  дн.-экв.;  $t_{m4} = 40,88$  дн.-экв.

На рис. 4 показано уменьшение модуля упругости эквивалентного в результате длительного пребывания под нагрузкой.

Рис. 4. Зависимость модуля упругости от эквивалентного времени пребывания древесины под нагрузкой



Используя оцифрованную гистограмму предела прочности (см. рис. 2, б) и выполнив те же шаги, что и при обработке оцифрованных гистограмм модуля упругости, выделим четыре нормальных закона распределения (рис. 5):

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$  – среднее арифметическое предела прочности в группах;

$s_1, s_2, s_3, s_4$  – среднее квадратическое предела прочности в группах;

$Fp_1, Fp_2, Fp_3, Fp_4$  – частота среднего арифметического предела прочности в группах;

$F_{pi}$  – экспериментальное значение частоты предела прочности.

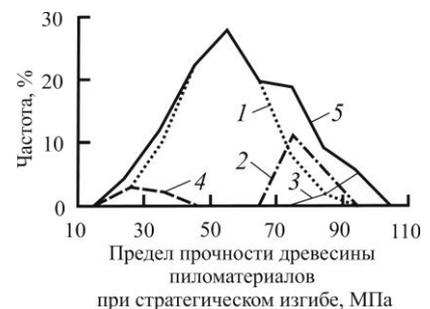
Рассчитаем долю каждой группы образцов с разными параметрами распределения: доля группы  $k_1$  – 0,759;  $k_2$  – 0,138;  $k_3$  – 0,060;  $k_4$  – 0,044.

Самой прочной является третья группа, но доля ее в пиломатериалах (готовой продукции ЛПК) очень мала ( $k_3 = 0,060$ ).

Примем интеграл распределения предела прочности в третьей группе за распределение в лесосеке (рис. 6, I), интеграл экспериментального распределения – за распределение предела прочности в пиломатериалах (рис. 6, II), а также оценим их по нормативам прочности [1]:

Группа прочности	1	2	3	4	5	6	7
Норматив, МПа	<30	30 ... 38	30 ... 48	48 ... 60	60 ... 75	75 ... 90	>90

Рис. 5. Последовательное выделение (по наибольшей частоте встречаемости) групп образцов, пределы прочности которых описываются нормальными распределениями: 1 – наиболее вероятное распределение  $k_1$  с параметрами  $\sigma_1 = 49,60$  МПа;  $s_1 = 13,10$  МПа;  $Fp_1 = 92,50$ ; 2 – наиболее вероятное из первого остатка распределение  $k_2$  с параметрами  $\sigma_2 = 74,00$  МПа;  $s_2 = 5,00$  МПа;  $Fp_2 = 16,80$ ; 3 и 4 – распределения из второго остатка  $k_3$  и  $k_4$  с параметрами  $\sigma_3 = 87,50$  МПа;  $s_3 = 5,20$  МПа;  $Fp_3 = 7,30$  и  $\sigma_4 = 25,20$  МПа;  $s_4 = 5,50$  МПа;  $Fp_4 = 5,30$ ; 5 – исходное распределение предела прочности



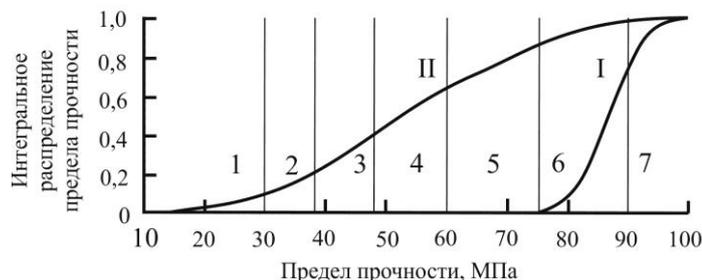


Рис. 6. Интегральное распределение предела прочности древесины в лесосеке (I) и в пиломатериалах (II): 1 – 7 – группы прочности

Для каждой группы рассчитаем коэффициент прочности как произведение предела прочности на долю группы.

Распределение пиломатериалов и древесины в лесосеке по группам прочности оформим в виде таблицы.

Группа прочности	Доля	Предел прочности	Коэффициент прочности
		МПа	
<i>Пиломатериалы</i>			
1	0,10	-	1,0
2	0,10	30	3,0
3	0,20	38	7,6
4	0,25	48	12,0
5	0,25	60	15,0
6	0,10	75	7,7
Итого	1,00		46,3
<i>Древесина в лесосеке</i>			
6	0,75	75	56,25
7	0,25	90	22,50
Итого	1,00	-	78,75

Прочность древесины в лесосеке соответствует 6-й (доля – 0,750 коэффициент прочности  $0,75 \cdot 75 \text{ МПа} = 56,25 \text{ МПа}$ ) и 7-й (доля – 0,25; коэффициент прочности  $0,25 \cdot 90 \text{ МПа} = 22,50 \text{ МПа}$ ) группам прочности. Коэффициент прочности древесины в лесосеке составляет 78,75 МПа.

Отношение коэффициента прочности пиломатериалов к коэффициенту прочности древесины в лесосеке равно  $46,30/78,75 = 0,59$ , что свидетельствует о значительном ослаблении древесины за технологический цикл. В настоящее время предприятия перешли на незамедлительную доставку заготовленной древесины потребителю автомобильным транспортом. Сократились потери прочности древесины от длительного хранения в штабелях.

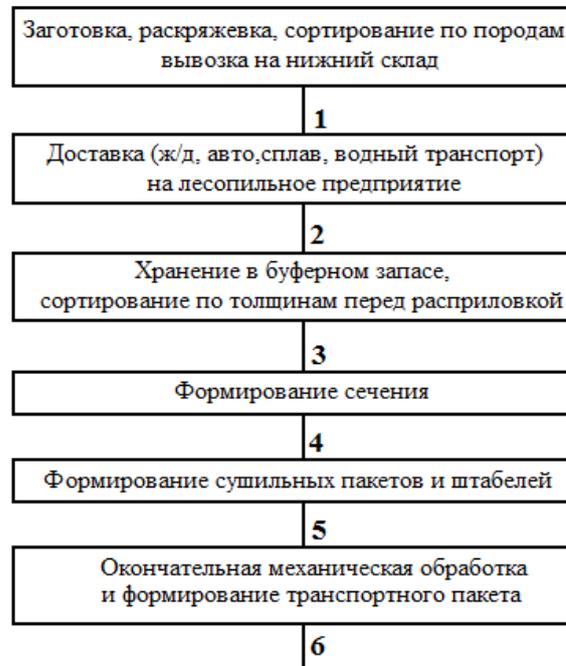


Рис. 7. Технологическая схема движения древесины от лесосеки до терминала: 1 – 6 – места выходного контроля показателей механических свойств пиломатериалов

Для проверки гипотезы об изменении модуля упругости и предела прочности древесины на пути от хлыста в лесосеке до пакета на терминале предлагается проводить выходной контроль показателей механических свойств на основных местах хранения и обработки древесины (рис. 7).

При наличии теоретической базы [3] неразрушающего контроля показателей механических свойств появилась возможность сортирования пиломатериалов по группам прочности и рационального использования древесины в конструкциях с гарантированной долговечностью. Некоторые вопросы рационального использования прочностных свойств пиломатериалов и ценообразования рассмотрены в работе [2].

Выполнение исследовательских работ в местах выходного контроля поможет оптимизировать транспортные и технологические операции по критерию минимальности повреждения древесины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине / Под ред. Б.Н. Уголева. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 296 с.

2. Дунаев В.Ф. Лесопиление: от геометрии к физике, механике и технологии // Лесн. журн. 2008. № 1. С. 90 – 100. (Изв. высш. учеб. заведений).

3. Дунаев В.Ф., Мелехов В.И. Закономерность изменения механических свойств древесины во времени при деформировании // Лесн. журн. 2010. № 3. С. 101 – 109. (Изв. высш. учеб. заведений).

4. Соболев Ю.С. Древесина как конструкционный материал. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 248 с.

Поступила 22.05.09

**V.F. Dounaev, Candidate of Engineering**

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russia  
E-mail:javzora@mail.ru

**Variability of Young's Modulus and Wood Tensile Strength in the Work Cycle**

The article describes the process of allocating each of the distributions of mechanical properties and calculates integral distributions of wood tensile strength in cutting areas and saw timber.

We established a previously unknown pattern of distribution of Young's modulus and tensile strength as a sum of four normal distributions with their arithmetic means and estimation of quadratic means. The original, natural distribution of Young's modulus and tensile strength of wood logs steadily deteriorated as a result of long-term storage of raw materials in piles in industrial depots, on sawmills in winter stocks, in interoperation stocks after log sorting by size and, finally, in stocks for drying and finished product stocks. Sampling was done at the stage of saw timber length formation, so that the samples contained the entire information about their mechanical properties.

Nondestructive testing of mechanical properties allowed us to sort saw timber by strength and rational use of wood in durable structures.

*Keywords:* Young's modulus, tensile strength, equivalent time of loading, cutting area, saw timber bundle, normal distribution, arithmetic mean, estimation of standard deviation.

REFERENCES

1. Borovikov A.M., Ugolev B.N. Handbook on Wood. Moscow, 1989. 296 p.
  2. Dounaev V.F. Sawmilling: from Geometry to Physics, Mechanics and Technology. *Lesnoy zhurnal*, 2008, no. 1, pp. 90–100.
  3. Dounaev V.F. Melekhov V.I. Pattern Changes of Wood Mechanical Properties in Time Under Deformation. *Lesnoy zhurnal*, 2010, no. 3, pp. 101–109.
  4. Sobolev Y.S. Wood as a Construction Material. Moscow, 1979. 248 p. (in Russian).
-