

УДК 630\*812

## **ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ ВО ВРЕМЕНИ ПРИ УДЕРЖАНИИ РЕАКЦИИ**

© *В.Ф. Дунаев, канд. техн. наук*

*В.И. Мелехов, д-р техн. наук, проф.*

*М.В. Захаров, канд. техн. наук, доц.*

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002

E-mail: javzora@mail.ru

Главным источником информации о свойствах материала являются диаграммы испытаний образцов. Однако многочисленные испытания образцов на растяжение, сжатие, изгиб, кручение и при других способах нагружения не позволили установить механизм явлений, происходящих в материалах при их пластической деформации (ползучести) и разрушении.

В литературе отсутствует теоретическое описание процесса деформирования и удержания.

Авторы поставили перед собой цель разработать на основе экспериментальных данных метод, описывающий поведение древесины, деформированной с постоянной скоростью до заданной реакции. Реакцию удерживают неизменной дополнительным деформированием материала вплоть до полного разрушения. Предстояло вывести уравнения состояния материала, с помощью которых можно было бы описать поведение материала в любой момент времени при различных деформациях и нагрузках.

Для анализа диаграмм деформирования и вывода уравнения, описывающих поведение образцов, авторы использовали универсальную интегрированную среду Mathcad 2001 Pro, позволяющую преобразовывать нелинейные диаграммы логарифмированием, дифференцированием (точнее, конечными разностями), приводя их к линейному виду и завершая поиск статистической обработкой под контролем коэффициента корреляции. Эти приемы позволили определить структуру уравнения ползучести, предел ползучести и долговечность материала.

При этом было отмечено, что ползучесть сопровождается уменьшением коэффициента упругости (поскольку реакция поддерживается постоянной). Такое поведение не соответствует представлению о древесине, как о сплошной среде. Древесина имеет структуру, которая представляется как многомерная сеть, в узлах которой размещены элементы, обладающие свойствами трех последовательно соединенных звеньев: интегрирующего, инерционного первого порядка и с запаздыванием (в терминах теории автоматического управления), составляющих структуру (атомы, молекулы, клетки и др. соединения).

Полученное уравнение применимо в теории упругости, теории пластичности и ползучести.

*Ключевые слова:* древесина, структура древесины, элементы структуры, звенья элементов, деформированная древесина, диаграмма (экспериментальная кривая), деформирование, ползучесть, долговечность, реакция, пределы релаксации и ползучести.

Древесина как конструкционный материал широко применяется в строительстве и других областях. Для надежной эксплуатации деревянных конструкций необходимо учитывать механические свойства каждого элемента конструкции, определять долговечность конструкции, при этом необходимо иметь соответствующее теоретическое обоснование – уравнение напряженно-деформированного состояния материала с учетом реальных параметров каждого элемента конструкции.

Как отмечают некоторые авторы, главным источником информации о свойствах материала являются диаграммы того или иного вида испытаний образцов, однако «...многочисленные испытания образцов на растяжение, сжатие, изгиб, кручение и при других способах нагружения не позволили установить механизма явлений, происходящих в металлах при их пластической деформации и разрушении, ... все попытки разработать теорию процессов пластической деформации и разрушения, основанные на представлении о металле, как о сплошной непрерывной среде [8], не принесли желаемых результатов формальные методы расчетов на основании любой из известных теорий прочности не могли дать удовлетворительного объяснения феноменологическим проявлениям процесса пластической деформации, не говоря уже о ее механизме. Даже при расчетах, выполненных с учетом сил межатомной связи в кристаллической решетке, получались значения механических характеристик, резко отличающиеся от измеренных экспериментально» [1, с. 6].

Из приведенного следует, что при всех видах деформирования и нагружения материала не удалось вывести уравнения состояния, с помощью которого можно было бы описать его поведение в любой момент времени при различных деформациях и нагрузках. О значительном расхождении теории пластичности с экспериментом можно судить по рис.1, а – в.[7].

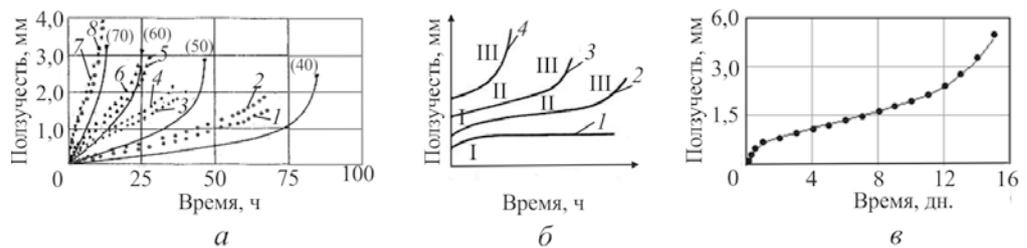


Рис. 1. Зависимость ползучести различных материалов от времени: а – экспериментальные (1 – 8) и теоретические (сплошные линии) кривые ползучести медных образцов при температуре 400 °С и напряжениях 40, 50, 60, 70 МПа [7]; б – характерные зависимости ползучести металлов (1 – 4); в – экспериментальная (точки) и теоретическая (сплошная линия) диаграммы древесины сосны при постоянной нагрузке и сжатии вдоль волокон [2, 5]

На рис. 1, б «...схематично изображены кривые, характеризующие зависимости ползучести  $\varepsilon$  металлов от времени  $t$  при различных напряжениях  $\sigma$ , прикладываемых ступенчато. Ползучесть имеет три четко выраженных участка: I – участок с постоянно уменьшающейся скоростью ползучести (неустановившаяся ползучесть), II – участок с постоянной (минимальной) скоростью ползучести (установившаяся ползучесть), III – участок ускоряющейся ползучести, предшествующий разрушению. При достаточно малых напряжениях кривая I может иметь только неустановившийся участок. На кривых 3 и 4, соответствующих достаточно большим напряжениям может отсутствовать участок I, в случае кривой 4 присутствует только участок III» [7]. Процесс ползучести описывается качественными признаками.

Как видно из рис. 1, в, экспериментальные диаграммы древесины подобны диаграммам деформирования металлов. Однако в литературе отсутствует теоретическое описание процессов деформирования до заданной реакции и удержания. Поэтому нами были определены и описаны зависимости реакций и ползучести для древесины при деформировании.

Рассмотрим результаты проведенных нами испытаний поперечным изгибом образца древесины сосны при скорости деформирования 5 мм/мин до реакции 2,7 кН с последующим удержанием реакции деформированием до полного разрушения образца.

Реакция древесины при непрерывном одноосном деформировании (рис. 2, а) удовлетворительно описывается уравнением состояния, которое приведено в работе [3]:

$$y(t) = Ex^b \exp(-ct), \quad (1)$$

где  $E$  – коэффициент упругости, кН/мм;

$x$  – деформация, мм;  $x = vt$ ;

$v$  – скорость,  $v = 5$  мм/мин;

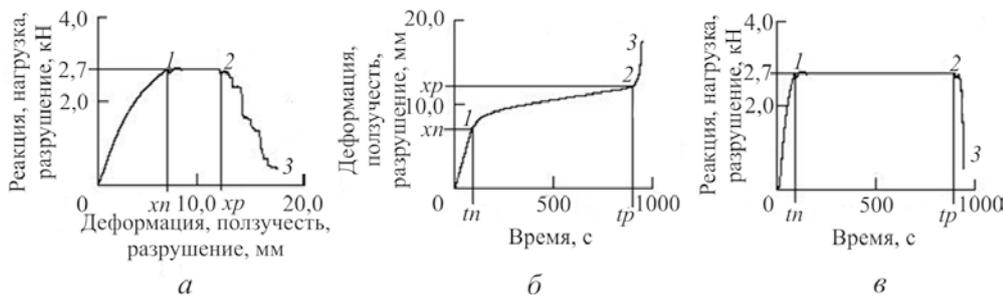


Рис. 2. Полные диаграммы испытания образца древесины сосны при поперечном изгибе: а – связь между деформацией (0 –  $x_n$ ), ползучестью ( $x_n$  –  $x_p$ ), разрушением ( $x_p$  – 3) – по оси  $x$  и реакцией (0 – 1), удержанием реакции (1 – 2), разрушением (2 – 3) – по оси  $y$ ; б – те же изменения  $x$  за время эксперимента; в – те же изменения  $y$  за время эксперимента ( $x_n$ ,  $x_p$  – начало и конец ползучести;  $t_n$ ,  $t_p$  – границы ползучести)

$t$  – время (продолжительность) испытания, с;  
 $b$  – структурный коэффициент, учитывающий нелинейное возрастание деформации;  
 $\exp$  – основание натурального логарифма;  
 $c$  – коэффициент, характеризующий скорость разрушения связей между структурными элементами,  $\text{с}^{-1}$ .

Для анализа участка 1 – 2 диаграмм деформирования (рис. 2, б и в) и вывода уравнений, описывающих поведение образцов, нами была использована универсальная интегрированная среда Mathcad 2001 Pro [6].

Сложность решения уравнения (1) заключается в неопределенности всех его коэффициентов. Компьютерные математические программы решают подобные уравнения итерационным методом и предварительным заданием начальных условий.

По результатам расчета получено уравнение

$$y(t) = 0,785x^{1,05} \exp(-0,00934t), \quad (2)$$

откуда  $E = 0,785 \text{ кН/мм}$ ;  $b = 1,05$ ;  $c = -0,00934 \text{ с}^{-1}$ .

После совмещения на одном поле (рис. 3) диаграммы деформирования (сплошная линия) и графика (пунктирная линия), построенного по уравнению (2), видно, что линия, проведенная на уровне 2,7 кН, пересекает график 1 в точках, соответствующих началу ( $x_n = 6,5 \text{ мм}$ ) и концу ползучести ( $x_p = 11,8 \text{ мм}$ ).

С помощью команды «*root* ( $y(x), x$ )» [6] рассчитаем начальную и конечную точки ползучести:

$$\text{root}(y(t) - 2,7, x); x_n = 6,5 \text{ мм}; x_p = 11,8 \text{ мм}. \quad (3)$$



Рис. 3. Диаграмма деформирования до реакции 2,7 кН и ее удержание до полного разрушения: 0–1 – диаграмма деформирования; 1–2 – линия ползучести образца под нагрузкой 2,7 кН; 1 – начальная точка ползучести; 2 – точка полного разрушения; 3 – расчетная точка максимальной реакции ( $x = 8,79 \text{ мм}$ )

Расчетное значение предела ползучести  $x_p$  совпадает с экспериментальным. Таким образом можно вычислить ползучесть при любых заданных нагрузках. Определим продолжительность процесса ползучести, которая называется также долговечностью.

*Закономерность развития ползучести во времени*

Поведение образца во время перехода системы управления от деформирования с постоянной скоростью к удержанию нагрузки показаны на рис. 4, *а* и *б*; графики, приведенные на рис. 4, *в* – *д*, отражают процесс выявления уравнения релаксации:

$$\ln(y - 2,59) = -2,2 - 0,545(t - t_n), \quad (4)$$

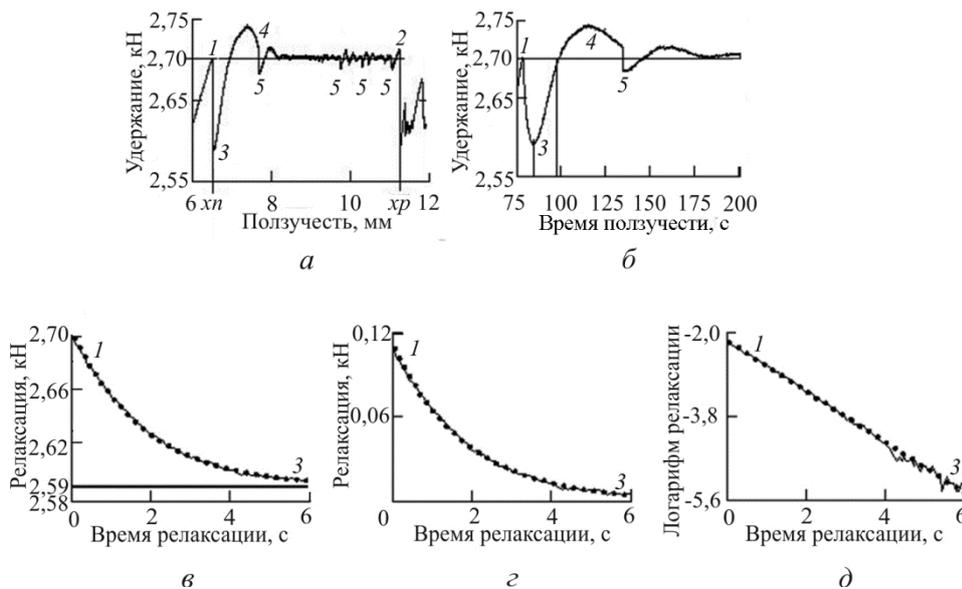


Рис. 4. Поведение образца во время перехода системы управления от деформирования с постоянной скоростью к удержанию нагрузки: *а* – удержание системой управления деформированием реакции 2,70 кН; *б* – развертка во времени начала процесса ползучести; *в* – развертка во времени процесса релаксации, 2,59 кН – предел релаксации; *г* – абсолютные значения релаксации; *д* – диаграмма абсолютных значений в логарифмическом масштабе (сплошная линия – экспериментальные данные, пунктирная – расчетные); 1 – момент останова  $x_l = 6,5$  мм, принятый за начало координат; 2 – конечная точка ползучести  $x_p = 11,8$  мм, сдвинутая на 6,5 мм; 3 – релаксация нагрузки на 0,11 кН за 6 с – время перехода программы управления в режим удержания; 4 – перерегулирование, вызванное инерционностью системы управления; 5 – мелкие хрупкие разрушения образца, вызывающие затухающие колебания в системе управления

где  $y$  – изменение реакции, кН;  
 2,59 – предел релаксации от 2,70 кН;  
 – 2,2 – логарифм модуля релаксации (аналогично модулю упругости);  
 – 0,545 – коэффициент, характеризующий скорость релаксации, с<sup>-1</sup>;  
 $t$  – текущее время эксперимента, с;  
 $tn$  – момент останова деформирования, начала релаксации, с.

После потенцирования, замены переменной и нормирования реакции получаем зависимость релаксации от времени:

$$re(y_n, t) = (0,041 \cdot \exp(-0,545 (t - tn)) + 0,959) y_n. \quad (5)$$

Существование не равного нулю предела релаксации свидетельствует о наличии у древесины пространственной структуры.

#### Структура уравнения ползучести древесины

Для доказательства структуры уравнения ползучести найдем первые разности приращения ползучести за единицу времени (рис. 5, а):

$$dx_i = (x_i - x_{i-1}) / (t_i - t_{i-1}),$$

где  $i$  – номер отсчета;  
 $i - 1$  – номер предыдущего отсчета.

Эта операция эквивалентна дифференцированию непрерывных функций и отражает скорость ползучести образца. График имеет минимум, равный 0,0037 мм/с, что свидетельствует о наличии в структуре элемента звена, разрушающегося с постоянной скоростью. Найдем отклонения скорости от минимального значения  $dx$ , прологарифмируем значения скорости и построим график (рис. 5, б).

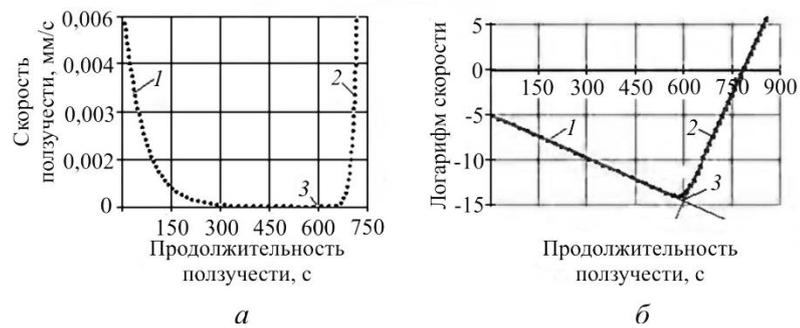


Рис. 5. Изменение скорости ползучести: а – в линейном масштабе; б – в логарифмическом масштабе; 1 – замедление скорости перед разрушением; 2 – ускорение перед разрушением; 3 – точка перехода от ползучести к разрушению (сплошная линия – экспериментальные данные, пунктирная – расчетные)

График на рис. 5, б аппроксимируем уравнением, содержащим слагаемые  $\ln(d1)$  и  $\ln(d2)$ :

$$\ln(d1) = -5,050 - 0,0159(t - tn); \quad \ln(d2) = -2,100 + 0,076(t - tp),$$

где  $tn$  – начало ползучести,  $tn = 87,4$  с;

$tp$  – начало возрастания скорости разрушения (время запаздывания),  
 $tp = 844$  с.

Представим это в линейном масштабе:

$$d1 = 6,4093 \cdot 10^{-3} \exp(-0,0159(t - tn));$$

$$d2 = 0,1225 \exp(0,0760(t - tp)).$$

Отметим, что

$$d1 = dx1/dt; \quad d2 = dx2/dt; \quad d3 = dx3/dt = 0,0037 \text{ мм/с},$$

где  $x1$ ,  $x2$  и  $x3$  – составляющие ползучести.

Проинтегрировав, находим зависимость всех составляющих ползучести от времени и реакции 2,70 кН:

$$x1 = \int d1 dt; \quad x2 = \int d2 dt; \quad x3 = \int d3 dt;$$

$$x1(2,70; t) = 1,62 (1 - \exp(-0,0159(t - tn)));$$

$$x2(2,70; t) = 1,61 \exp(0,0760(t - tp));$$

$$x3(2,70; t) = 0,0037t.$$

После нормирования коэффициентов относительно реакции 2,70 кН получим зависимость всех составляющих ползучести от удерживаемой реакции  $yn$  и времени  $t$ :

а) введем обозначения:

$k1 = 1,62 / 2,70 = 0,6$  мм/кН – коэффициент ползучести инерционного звена;

$cp1 = 0,0159 \text{ с}^{-1}$  – коэффициент разрушения инерционного звена;

$k2 = 1,61/2,70 = 0,596$  мм/кН – коэффициент ползучести звена с запаздыванием;

$cp2 = 0,076 \text{ с}^{-1}$  – коэффициент разрушения звена с запаздыванием;

$tp$  – продолжительность стадии ползучести (долговечность), с;

$k3 = 1,37 \cdot 10^{-3}$  мм/(с·кН) – скорость ползучести интегрирующего звена;

б) произведем подстановку:

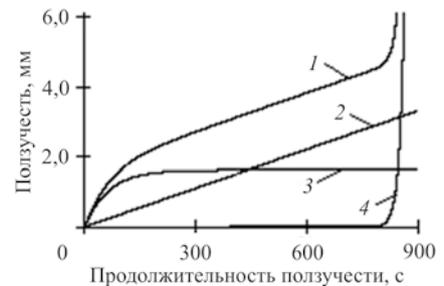
$$x1(t) = k [1 - \exp(-cp1(t - tn))] yn;$$

$$x2(t) = k2 \exp(cp2(t - tp)) yn;$$

$$x3(t) = k3 t yn;$$

$$x1(t) + x2(t) + x3(t) \leq xp. \quad (6)$$

Рис. 6. Слагаемые ползучести: 1 – экспериментальная диаграмма; 2 – ползучесть интегрирующего звена; 3 – ползучесть инерционного звена; 4 – ползучесть звена с запаздыванием



Здесь  $x_p$  – предел ползучести, вычисляемый по уравнению (3). Значение времени ползучести  $t_p$  является решением уравнения (6).

В уравнение (6), описывающее процесс ползучести, входят три звена (рис. 6), оказывающих сопротивление деформированию: интегральное, инерционное первого порядка и с запаздыванием (в терминах теории автоматического управления).

Интегрирующее звено (2) отражает накопление пластической деформации; инерционное звено первого порядка (3) откликается пропорционально силовому воздействию; звено с запаздыванием (4) откликается с задержкой на время, называемое долговечностью, и проявляется в лавинообразном развитии ползучести.

#### *Геометрическая модель структуры древесины*

О несоответствии древесины закономерностям механики сплошной среды, развиваемым в работе [8], отмечалось в [1, 2, 4, 5]. Результаты экспериментов, полученные авторами на испытательной машине, обработаны с помощью компьютерных программ. При этом отмечено, что ползучесть превышает деформацию, соответствующую максимуму реакции, сопровождается уменьшением коэффициента упругости (поскольку реакция поддерживается постоянной). Такое поведение не соответствует представлению о древесине как о сплошной среде.

Фрагмент структуры, предлагаемый нами для иллюстрации процесса ползучести древесины, приведен на рис. 7. Структура представляется как многомерная сеть, в узлах которой размещены элементы, составляющие структуру (атомы, молекулы, клетки и др. соединения). С ближайшими соседями элементы соединены упругими связями. Предполагается, что вся масса элемента сосредоточена в узле, все связи между элементами твердого тела равны между собой. В этом случае все элементы, не лежащие на поверхности, соседствуют с двенадцатью другими элементами, образующими пространственную фигуру – икосаэдр. Силами  $F_1$  растягиваются три цепочки межэлементных связей: 1–2–3–4; 1–5–6–7–4; 1–8–9–10–4. При разрыве межэлемент-

ных связей увеличивается деформация твердого тела и одновременно сокращается число параллельно соединенных цепочек.

Внешне это событие проявляется двояко: если тело деформировали с постоянной скоростью, то скорость роста реакции уменьшается, что эквивалентно сокращению числа цепочек; если тело нагружено постоянной силой, то наблюдается ползучесть – сокращается число цепочек, но увеличивается их длина. Например, после разрыва звена 2–3 между ними возникает связь через элементы 6 и 9; после разрыва звена 3–4 между ними возникает связь через элементы 7 и 10; после разрыва звена 1–2 между ними возникает связь через элементы 5 и 8. Между элементами 1 и 4 нагрузку воспринимают две цепочки: 1–5–6–7–4 и 1–8–9–10–4, каждая из них длиннее первой цепочки 1–2–3–4 на одно звено. Для удержания реакции потребуется дополнительно деформировать материал. Процесс удлинения цепочек заканчивается сокращением числа параллельных цепочек, за которым следует разрушение.

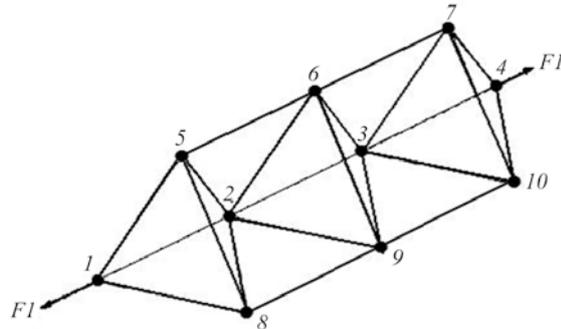


Рис. 7. Фрагмент структуры древесины как твердого тела: 1–10 – элементы структуры (атомы, молекулы, клетки и др. элементы); прямые линии – межэлементные связи;  $F1-F1$  – силы, растягивающие структуру

#### Выводы

1. За время деформирования образца до расчетной реакции формируют массив данных, который используют для расчета коэффициентов уравнения состояния (1) и предела ползучести.

2. Полученное уравнение состояния позволяет рассчитывать предел ползучести древесины для всех реакций материала.

3. Уравнение состояния (1) может быть использовано в теории упругости, которая является основой расчетов на прочность, деформируемость и устойчивость.

4. Уравнение (3) применимо для определения максимального размера ползучести.

5. Уравнение ползучести (6) применимо для расчета длительности приложения нагрузок (долговечности), а также больших деформаций и нагрузок, когда проявляется нелинейная зависимость между ними и применение элементарного закона Гука приводит к существенным погрешностям в расчетах при больших деформациях и нагрузках.

6. Уравнение ползучести (6) применимо в теории пластичности и ползучести, изучающей законы, которые отражают связи между напряжениями и упругопластическими деформациями древесины, разрабатывает методы ре-

шения задач о равновесии и движении деформируемых твердых тел и является основой расчетов конструкций с учетом максимального использования прочностных и деформационных ресурсов древесины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бернштейн М., Займовский В.А.* Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1979. 496 с.
2. *Быковский В.Н.* Применение механики упруговязких тел к построению теории сопротивления древесины с учетом фактора времени // Исследования прочности и деформативности древесины: сб. ст.; под ред. Г.Г. Карлсена. М.: Гос. изд-во лит-ры по строительству и архитектуре, 1956. С. 32 – 41.
3. *Дунаев В.Ф., Мелехов В.И.* Закономерность изменения механических свойств во времени при деформировании // Лесн. журн. 2010. № 3. С. 101 – 109. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. *Иванов Ю.М.* Предел пластического течения древесины. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1948. 200 с.
5. *Коцегубов В.П.* Некоторые вопросы долговременного сопротивления древесины сжатию вдоль волокон // Исследования прочности и деформативности древесины: сб. ст.; под ред. Г.Г. Карлсена. М.: Гос. изд-во лит-ры по строительству и архитектуре, 1956. С. 127 – 141.
6. *Кудрявцев Е.М.* Mathcad 2001 Pro. М.: ДМК Пресс, 2001. 576 с.
7. *Локощенко А.М.* Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов: моногр. М.: МГИУ, 2007. 264 с.
8. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды. М.: Наука. Главн. ред. физ.-мат. лит-ры, 1984. 560 с.

Поступила 05.12.12

#### **Pattern Changes of Wood Mechanical Properties in Time Under Reaction Confinement**

*V.F. Dunaev, Candidate of Engineering*

*V.I. Melekhov, Doctor of Engineering, Professor*

*M.V. Zakharov, Candidate of Engineering, Associate Professor*

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

The main sources of information about the properties of the material are diagrams of a particular type of sample test. However, numerous tensile, compression, bending, and twisting tests as well as other methods of loading could not help determine the mechanisms of the phenomena occurring in the materials at their plastic deformation (creep) and destruction.

In scientific literature, there is no theoretical description of the process of deformation and confinement.

On the basis of the experimental data, the authors aimed to develop a method describing behaviour of wood deformed at a constant rate to the given reaction value. The reaction is kept constant by additional material deformation up to complete destruction. The task was to derive an equation of material state which would allow us to describe behaviour of the material at any time under various loads and deformations.

To analyze deformation diagrams and develop an equation describing the behaviour of the samples, the authors used a universal integrated environment Mathcad 2001 pro allowing one to convert nonlinear diagrams by taking logarithms and by differentiating (more precisely, by finite differences), making them linear and completing the search by statistical processing under the control of the correlation coefficient. These techniques helped determine the structure of creep equation, creep strength, and durability.

Creep was accompanied by a decrease in coefficient of elasticity (as the reaction was maintained constant). This behaviour is inconsistent to the view of wood as a continuous medium. The structure of the wood shows up as a multi-dimensional network, nodes of which contain elements with properties of three series-connected circuits: the integrator, the first order relaxation circuit, and the delay component (in terms of the automatic control theory), which make up a structure (atoms, molecules, cells, and other compounds).

The equation developed can be applied in the theories of elasticity, plasticity and creep.

*Keywords:* wood, structure of wood, elements of the structure, parts of the elements, deformed wood, chart (experimental curve) deformation, creep, durability, reaction, relaxation limit, creep limit.

#### REFERENCES

1. Bernshteyn M.L., Zaymovskiy V.A. *Mekhanicheskie svoystva metallov* [Mechanical Properties of Metals]. Moscow, 1979. 496 p.
2. Bykovskiy V.N. *Primenenie mekhaniki uprugovyazkikh tel k postroeniyu teorii soprotivleniya drevesiny s uchetom faktora vremeni* [Viscoelastic Bodies Mechanics Applied to the Construction of the Theory of Time-Dependent Resistance of Wood]. *Issledovaniya prochnosti i deformativnosti drevesiny* [Research on Wood Strength and Deformability]. Moscow, 1956, pp. 32–41.
3. Dunaev V.F., Melekhov V.I. *Zakonomernost' izmeneniya mekhanicheskikh svoystv vo vremeni pri deformirovani* [Pattern Changes of Wood Mechanical Properties in Time Under Deformation]. *Lesnoy zhurnal*, 2010, no. 3, pp. 101–109.
4. Ivanov Yu.M. *Predel plasticheskogo techeniya drevesiny* [Plastic Yield Point of Wood]. 2nd ed. Moscow, 1948. 200 p.
5. Kotsegubov V.P. *Nekotorye voprosy dolgovremennogo soprotivleniya drevesiny sosny szhatiyu vdol' volokon* [Some Issues of Continuous Resistance of Pine Wood to Compression Along the Fibers]. *Issledovaniya prochnosti i deformativnosti drevesiny* [Research on Wood Strength and Deformability]. Moscow, 1956, pp. 127–141.
6. Kudryavtsev E.M. *Mathcad 2001 Pro*. Moscow, 2001. 576 p.
7. Lokoshchenko A.M. *Modelirovanie protsessa polzuchesti i dlitel'noy prochnosti metallov* [Simulation of Creep Process and Continuous Strength of Metals]. Moscow, 2007. 264 p.
8. Sedov L.I. *Mekhanika sploshnoy sredy* [Continuum Mechanics]. Moscow, 1984. 560 p.