

## О ПОЛЗУЧЕСТИ ДРЕВЕСИНЫ

Вареник А.С.<sup>1</sup>, Вареник К.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», Великий Новгород, Россия (173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41), e-mail: [vkirillv89@mail.ru](mailto:vkirillv89@mail.ru)

В статье приведены экспериментальные данные по кривым характеристик ползучести древесины. В экспериментах выявлено, что при сжатии, растяжении и изгибе деформации ползучести существенно различаются. Результаты экспериментов указывают на необходимость учета в расчетных моделях упруго-пластических свойств и нелинейной ползучести древесины. Представлен анализ уравнений ползучести, предложенных разными учеными. Сделан вывод о том, что в существующих моделях длительной прочности не учитывается одновременно мгновенная нелинейность и нелинейная ползучесть древесины. Выполнена обработка экспериментальных данных и получены кривые предельных значений характеристик ползучести при изгибе и сжатии. Получены аналитические выражения характеристик ползучести в зависимости от уровня напряжений. Аппроксимирующие зависимости могут быть использованы для нахождения длительной прочности элементов при сжатии с учетом ползучести древесины.

Ключевые слова: ползучесть древесины, относительная деформация, характеристика ползучести, длительная прочность.

## REGARDING CREEP OF WOOD

Varenik A.S.<sup>1</sup>, Varenik K.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> The Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia (173003, Veliky Novgorod, B. St.-Peterburgskaya St., 41), e-mail: [vkirillv89@mail.ru](mailto:vkirillv89@mail.ru)

The article has been presented experimental data on curves of the characteristics of creep of wood. The experiments revealed that at compression, tension and bending creep deformation significantly differs. The experimental results indicate the need for the design models of elastic-plastic properties and nonlinear creep of wood. The analysis of creep equations proposed by different scientists has been presented. The conclusion has been drawn that in existing models of long durability instant nonlinearity and at the same time nonlinear creep of wood isn't considered. Processing of experimental data has been executed and curves limit value of characteristics of creep have been received at bend and compression. Analytical expressions of characteristics of creep depending on level of tension have been received. Approximating dependences can be used for finding of long durability of elements at compression taking into account creep of wood.

Keywords: creep of wood, relative deformation, creep characteristic, long durability.

### Введение

Экспериментальные исследования древесины при кратковременном и длительном нагружении выявили существенную нелинейность ее поведения при различных схемах нагружения. Нелинейность проявляется даже при относительно небольших напряжениях. В связи с этим одно из важнейших направлений в совершенствовании норм проектирования деревянных конструкций – учет длительной прочности и ползучести древесины.

### Экспериментальные исследования ползучести древесины

Экспериментальные исследования при длительном нагружении выявили, что деформации ползучести зависят от ряда факторов [8]: вид и уровень нагрузки, влажность, температура и др. На рис. 1 показана зависимость характеристики ползучести  $\varphi = \frac{\epsilon_{п}}{\epsilon_{у}}$  от вида нагрузки.

ки.

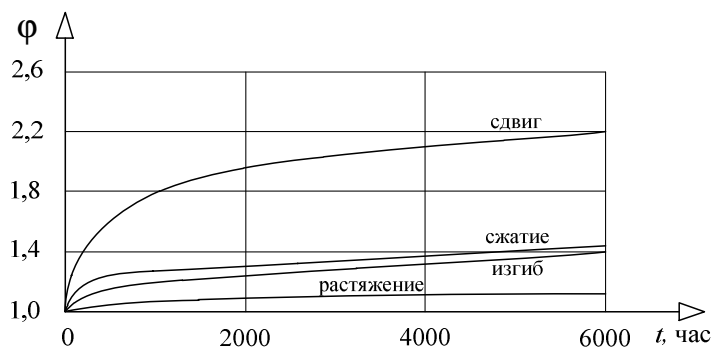


Рис. 1. Характеристики ползучести в зависимости от вида нагрузки

Зависимости деформаций ползучести от уровня нагрузки при сжатии и изгибе представлены на рис. 2 и 3.

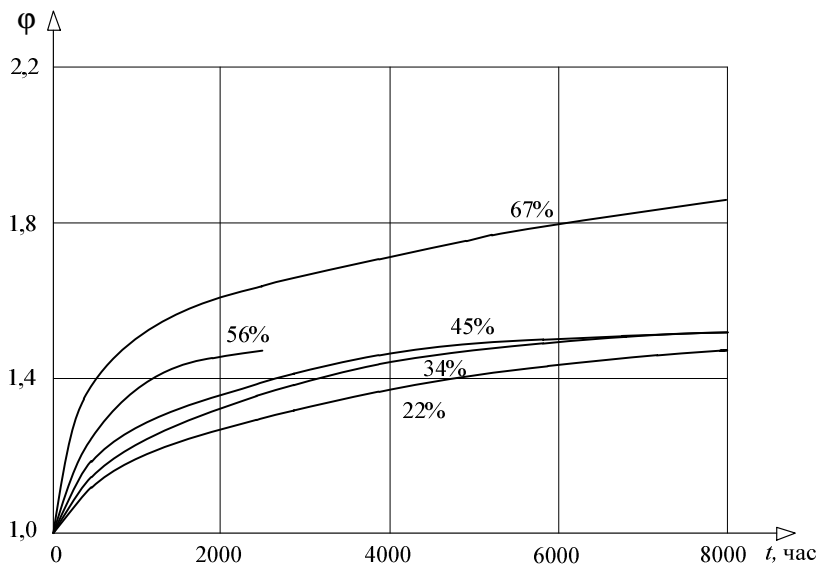


Рис. 2. Характеристики ползучести при сжатии в зависимости от уровня нагрузки в % от кратковременного предела прочности

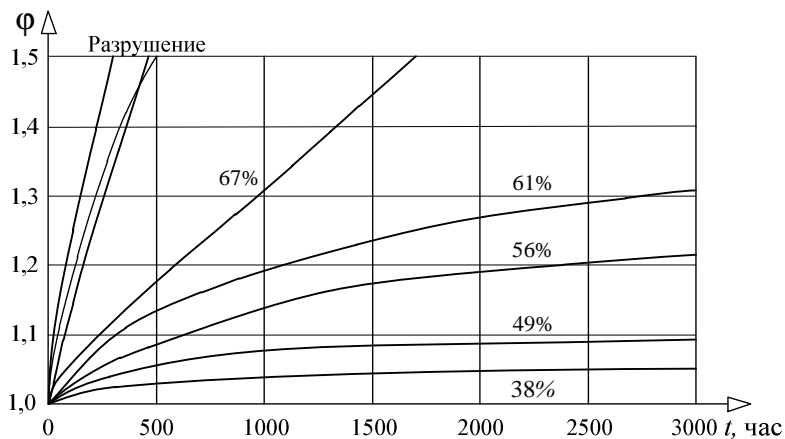


Рис. 3. Характеристики ползучести при изгибе в зависимости от уровня нагрузки в % от кратковременного предела прочности

Результаты исследований ползучести древесины показывают существенную зависимость характеристик ползучести при различных видах приложения нагрузки и различных уровнях нагружения. Таким образом, экспериментальные данные по кривым характеристик ползучести древесины указывают на необходимость учета нелинейной ползучести, а также влияния диаграммы мгновенного деформирования в уравнениях ползучести.

### Уравнения ползучести древесины

Обстоятельный обзор по уравнениям механического состояния древесины содержится в диссертации К.П. Пятикрестовского [5]. Из обзора видно, что для описания ползучести древесины предложено два интегральных уравнения линейной ползучести.

Во-первых, это уравнение наследственной теории пластичности, предложенное А.Р. Ржаницыным к описанию ползучести древесины [6]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0} + \frac{E_0 - H}{E_0^2 n} \int_0^t \sigma(\tau) e^{-\frac{H(t-\tau)}{E_0 n}} d\tau, \quad (1)$$

где  $E_0$  – мгновенный модуль упругости ( $E_0 = 1,48 \cdot 10^4$  МПа);  $H$  – длительный модуль упругости, который принимает значения  $H = (0,6 \div 0,75)E_0$ ;  $n$  – время релаксации, в зависимости от вида напряженного состояния  $n = 10-25$  суток (обычно принимают среднее значение).

К этой группе моделей применяют уравнение Максвелла, использованное Е.Н. Квасниковым [3]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{E_0} \dot{\sigma} + \frac{1}{k} \sigma, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент вязкости ( $\sigma = k \cdot \varepsilon_{\Pi}$ ), или коэффициент внутреннего сопротивления деформации.

На основании многочисленных экспериментов Е.А. Квасников определил соотношение  $\frac{E_0}{k}$  в следующем виде:

$$\frac{E_0}{k} = \frac{n^*}{n} \left( \frac{t}{n} \right)^{n^*-1}, \quad (3)$$

где  $n^* = 0,38$  – коэффициент, характеризующий нелинейность вязкого сопротивления.

Уравнение ползучести древесины записано в линейном виде:

$$\dot{\sigma} + \sigma \frac{n^*}{n} \left( \frac{t}{n} \right)^{n^*-1} = E_0 \dot{\varepsilon}. \quad (4)$$

Во-вторых, это линейная теория наследственной ползучести Максвелла-Арутюняна, использованная И.Е. Прокоповичем и В.А. Зедгенидзе для описания ползучести древесины [4]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{E(\tau)} d\tau - \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau, \quad (5)$$

где  $C(t, \tau) = (C_0 + Ae^{-\gamma\tau}) \cdot [1 - B_1 e^{-\gamma_1(t-\tau)}]$ ;  $C_0 = 2,87 \cdot 10^{-5} \text{ (МПа)}^{-1}$ ,  $A = 10,95 \text{ (МПа)}^{-1}$ ;  $B_1 = 1$ ;  $\gamma = \gamma_1 = 0,15 \text{ (1/сут)}$ .

А.Р. Ржаницын осуществил усовершенствование уравнения линейной ползучести с помощью способа А.Ю. Ишлинского:

$$\dot{\varepsilon}(t) E_0 n + \varepsilon(t) H = \sigma(t) + n \dot{\sigma}(t), \quad (6)$$

где  $H$  – длительный модуль упругости;  $E_0$  – мгновенный модуль упругости;  $n$  – время релаксации.

Академик А.Ю. Ишлинский [2] добавил в уравнение

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} b + \varepsilon(t) b n_1 = r \sigma(t) + \frac{d\sigma(t)}{dt} \quad (7)$$

постоянное слагаемое, зависящее от предела текучести материала  $\sigma_S$ :

$$\frac{d\sigma}{dt} + r\sigma = b \frac{d\varepsilon}{dt} + b n \varepsilon \pm \sigma_S (r - n), \quad (8)$$

где  $b$ ,  $n_1$ ,  $r$  – физические константы тела по А.И. Лурье:  $b$  – модуль упругости;  $n_1$  – коэффициент интенсивности упругого последействия,  $r$  – коэффициент интенсивности релаксации напряжений.

А.Р. Ржаницын на основании способа А.Ю. Ишлинского предложил для древесины два варианта уравнения нелинейной ползучести [7]. В первом варианте он отбросил в левой части уравнения (6) второе слагаемое, превратив его в уравнение Максвелла:

$$n E_0 \dot{\varepsilon}(t) = n \dot{\sigma}(t) + \sigma(t). \quad (9)$$

Затем он добавил в правой части слагаемое в виде предела текучести древесины  $\sigma_T$ :

$$n E_0 \dot{\varepsilon}(t) = n \dot{\sigma}(t) + \sigma(t) - \sigma_T. \quad (10)$$

Переход к этому уравнению от уравнения (6) осуществляется в момент  $t_1$  достижения полной деформацией древесины значения  $\varepsilon(t_1) = \frac{\sigma_T}{E_0}$ .

Использование уравнения (10) прекращается в момент времени  $t_2$  достижения полной деформацией древесины значения  $\varepsilon(t_2) = \frac{\sigma_T}{F}$ , где  $F$  представляет собой отрицательный длительный модуль упругости (константа) в неустойчивой стадии деформирования.

Для этой же стадии линейное уравнение ползучести записывается в следующем виде:

$$nE_0 \dot{\varepsilon}(t) - F\varepsilon(t) = n\dot{\sigma}(t) + \sigma(t) - 2\sigma_T. \quad (11)$$

Линейные дифференциальные уравнения (10) и (11) решаются обычными методами линейной теории ползучести.

### Аппроксимация экспериментальных данных характеристик ползучести

В теории ползучести и Еврокодах используется характеристика ползучести  $\varphi(t)$ , представляющая собой отношение деформации ползучести  $\varepsilon_{\Pi}(t)$  к первоначальной мгновенной деформации  $\varepsilon_M$ :

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon_{\Pi}(t)}{\varepsilon_M}. \quad (12)$$

Функция  $\varphi(t)$  получается на основе обработки экспериментов и записывается в виде:

$$\varphi(t) = \varphi_{\infty} (1 - e^{-bt}), \quad (13)$$

где  $\varphi_{\infty}$  - предельное значение характеристики ползучести.

Обработка экспериментальных кривых ползучести позволила получить кривые зависимости предельных значений характеристик ползучести  $\varphi_{\infty}$  в зависимости от уровня напряжения  $\frac{\sigma}{R}$  (рис. 4).

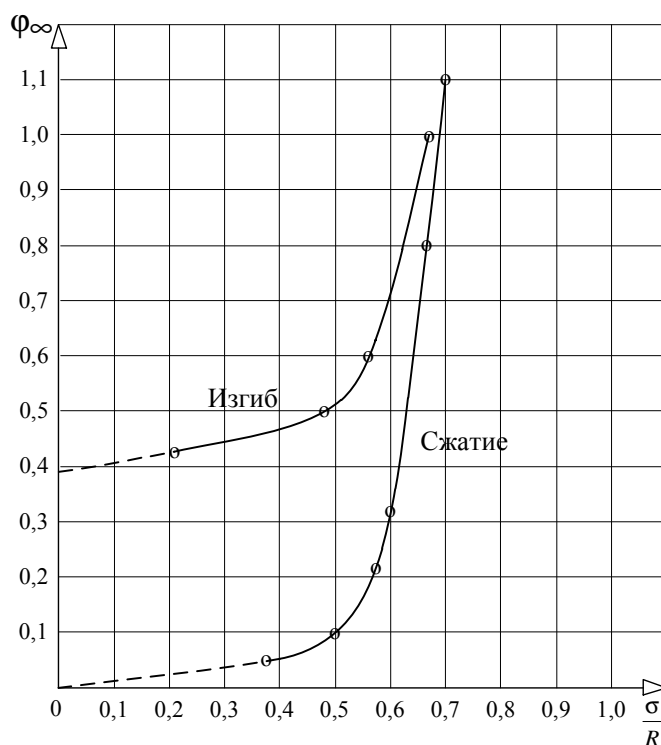


Рис. 4. Экспериментальные данные и аппроксимация значений  $\varphi_{\infty}$

Из данных рис. 4. видно, что характеристика ползучести древесины при сжатии и при изгибе в области малых и средних значений  $\frac{\sigma}{R}$  существенно различна.

Значения предельной характеристики ползучести древесины  $\varphi_{\infty}\left(\frac{\sigma}{R}\right)$  аппроксимируем полиномом третьей степени. Для случая работы древесины на сжатие получаем:

$$\varphi_{\infty}^c = 0,132\frac{\sigma}{R} - 5,28\frac{\sigma^2}{R^2} + 10,3\frac{\sigma^3}{R^3}. \quad (14)$$

Для случая работы древесины на изгиб:

$$\varphi_{\infty}^и = 0,182\frac{\sigma}{R} + 2,4\frac{\sigma^2}{R^2} - 0,71\frac{\sigma^3}{R^3}. \quad (15)$$

В работе [1] для нахождения длительной критической силы  $P_{дл}$  предлагается квадратное уравнение:

$$P_{дл} + \varphi_{\infty}P_{дл} + 0,1\varphi_{\infty}\frac{P_{дл}^2}{F} = P_{\varepsilon}, \quad (16)$$

где  $P_{\varepsilon} = \frac{\pi^2 E_0 I}{l^2}$  - значение критической силы Эйлера,  $F$  - площадь поперечного сечения.

Таким образом, уравнение (18) позволяет найти длительную несущую способность для сжатого деревянного элемента через критическую силу Эйлера с учетом ползучести древесины.

### Выводы

1. Экспериментальные данные по кривым характеристик ползучести древесины указывают на необходимость учета нелинейной ползучести, а также влияния диаграммы мгновенного деформирования в уравнениях ползучести.
2. В существующих моделях длительной прочности не учитывается одновременно мгновенная нелинейность и нелинейная ползучесть древесины.
3. Обработка экспериментальных данных позволила получить аналитические выражения характеристик ползучести в зависимости от уровня напряжений. Аппроксимирующие зависимости могут быть использованы для нахождения длительной несущей способности для сжатого деревянного элемента через критическую силу Эйлера с учетом ползучести древесины.

### Список литературы

1. Вареник А.С., Вареник К.А. Длительная несущая способность деревянных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2014. - № 2. - С. 23-31.

2. Ишлинский А.Ю. Прикладные задачи механики. В 2-х т. - М. : Наука, 1986. – Т. 1. Механика вязкопластических и не вполне упругих тел. - 359 с.
3. Квасников Е.Н. Вопросы длительного сопротивления древесины и конструктивных материалов из дерева и слоистых пластиков. - Л., 1972. - 95 с.
4. Прокопович И.Е., Зедгенидзе В.А. Прикладная теория ползучести. - М. : Стройиздат, 1980. - 240 с.
5. Пятикрестовский К.П. Силовое сопротивление пространственных деревянных конструкций при кратковременных и длительных нагрузках : дис. ... д-ра техн. наук. - М., 2011. - 320 с.
6. Ржаницын А.Р. Теоретические предпосылки к построению методов расчета деревянных конструкций во времени // Исследования прочности и деформативности древесины. – М. : 1956. – С. 21-31.
7. Ржаницын А.Р. Разработка основ общей теории ползучести // Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных материалов. - М. : Госстройиздат, 1955. - С. 33-44.
8. Schänzlin J. Modeling the long-term behavior of structural timber for typical serviceclass-II-conditions in South-West Germany. Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf, Nr. 2010-2 Institut für Konstruktion und Entwurf; Stuttgart, 2010. - 185 p.

**Рецензенты:**

Санжаровский Р.С., д.т.н., профессор кафедры «Строительные конструкции», ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород.

Швецов И.В., д.т.н., заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород.