

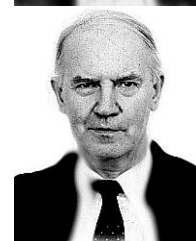
УДК 624.011.1:624.046

***Н.В. Шешукова, Б.К. Михайлов***

Шешукова Наталья Владимировна родилась в 1960 г., окончила в 1982 г. ЛИСИ, кандидат технических наук, докторант кафедры конструкций из дерева и пластмасс С.-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. Имеет около 20 печатных работ.



Михайлов Борис Кузьмич родился в 1938 г., окончил в 1960 г. ЛИСИ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкций из дерева и пластмасс С.-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. Имеет более 200 печатных работ в области исследования строительных конструкций из дерева и пластмасс, соединений на нагелях.



## **РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕ- ФОРМАТИВНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ С УЧЕТОМ ВЛАЖНОСТИ**

Установлено, что метод напряженно-временной аналогии может быть рекомендован для экспресс-анализа деформативности древесины в узловых соединениях на нагелях деревянных конструкций при различных режимах эксплуатации.

*Ключевые слова:* прочность и деформативность, деревянные конструкции, нагельные соединения, метод напряженно-временной аналогии, прогнозирование деформативности древесины, влажность древесины.

Совершенствование деревянных конструкций, появление новых технологий и применение новых материалов в строительстве, а также возросшие требования к безопасной работе конструкций предписывают дополнительное изучение прочности и деформативности соединений элементов на нагелях с учетом влажности при различных видах нагружения [1].

Общий недостаток, присущий всем нагельным соединениям, – увеличение деформаций при действии постоянных нагрузок. Ползучесть этих соединений является следствием упруговязкой и пластической работы древесины на смятие. Податливость нагельных соединений в современных нормах ограничена величиной предельных деформаций, равных 2 мм, которые определены на основании линейной зависимости деформаций от уровня напряжений. Однако результаты исследований [3, 4] показывают, что деформации смятия древесины в нагельном гнезде при длительном нагружении имеют нелинейную зависимость от уровня напряжений.

Для описания процесса деформативности материалов, обладающих физической нелинейностью применяют различные методы. Одним из наи-

более эффективных является метод напряженно-временной аналогии (НВА). Он основан на принципе подобия кривых податливости материала, построенных по результатам экспериментальных данных в полулогарифмических координатах  $J - \ln t$ . Это позволяет расширить временной интервал для прогнозирования деформативности древесины и, кроме того, компактно описать нелинейную вязкоупругость как простых, так и сложных напряженных состояний. При этом аппроксимирующий вид функции может быть установлен экспериментально, независимо от того, как представлена обобщенная кривая: графически или аналитически [2, 3, 6].

В целях получения данных, подтверждающих возможность применения метода НВА для прогнозирования деформативности древесины, проводили длительные испытания на рычажных установках, вдавливая цилиндрический штамп в деревянный образец. Размеры образцов назначали в соответствии с требованиями существующих норм [7]. Для достижения равномерного распределения напряжений смятия по длине нагеля толщину образцов принимали равной  $2d$ , ширину –  $6d$  (где  $d$  – диаметр нагельного штампа). Такая схема обеспечивала деформацию древесины в отверстиях, в основном соответствующую смятию древесины нагельных гнезд в сжатых стыках. Были исследованы случаи смятия древесины в отверстиях под углом  $\alpha = 0, 45$  и  $90^\circ$  по отношению к волокнам. Диаметр нагеля 16 мм.

В результате испытаний было установлено, что процесс ползучести древесины при смятии в нагельном гнезде и различных влажностных состояниях можно разделить на две области слабой нелинейности вязкоупругих свойств: 1 – когда существует  $a_\sigma$ ; 2 –  $a_\sigma$  и  $b_\sigma$ .

Анализируя экспериментальные данные, к области слабой нелинейности можно отнести результаты испытаний образцов, сминаемых вдоль волокон древесины разной влажности и поперек волокон древесины, имеющей влажность  $W = 5\%$ . Мгновенные деформации определяли по кривой  $\varphi[\varepsilon(t)]$  и вычисляли по формуле

$$\varepsilon_n(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_0,$$

где  $\varepsilon(t)$  – среднее значение деформации ползучести в данной точке экспериментальной кривой в момент времени  $t$ ;

$$\varepsilon_0 - \text{мгновенные деформации, } \varepsilon_0 = \frac{a\sigma}{1 - b\sigma}.$$

Далее для каждой кривой ползучести рассчитывали вязкоупругую податливость:

$$J^n(t) = \frac{E_n(t)}{\sigma}.$$

Согласно методике, приведенной в работе [4], для каждого интервала изменения напряжения определяли коэффициент перекрытия кривых вязкоупругой податливости:

$$K_{II} = \frac{J_{\max}^{II}(\sigma_i) - J_{\min}^{II}(\sigma_{i+1})}{J_{\max}^{II}(\sigma_{i+1}) - J_{\min}^{II}(\sigma_i)}, \quad (1)$$

где  $J_{\max}^{II}(\sigma_i)$  и  $J_{\max}^{II}(\sigma_{i+1})$  – вязкоупругая податливость, зафиксированная при максимальном времени отсчета  $t_{\max}$  для  $\sigma_i$  и  $\sigma_{i+1}$ ;

$J_{\min}^{II}(\sigma_i)$  и  $J_{\min}^{II}(\sigma_{i+1})$  – то же при минимальном времени отсчета  $t_{\min}$ .

Для проверки применимости метода НВА для других серий испытаний измеряли расстояния по горизонтали между каждой парой соседних кривых  $J^{II}(t)$ . Результаты измерений представлены в таблице.

**Коэффициенты напряженно-временного сдвига  
при разных уровнях напряжений**

Условия	$\frac{\sigma_i \dots \sigma_{i+1}}{\sigma_{sp} \dots \sigma_{sp}}$	$\Delta \ln a_{\sigma}$	$\sigma$	$\sqrt{\sigma}$	$C_v, \%$
		ч			
$\alpha = 0^\circ$ $W = 15 \%$	0,2 ... 0,5	1,292	0,121	0,1320	10,2
	0,5 ... 0,7	0,250	0	0	0
	0,7 ... 0,9	0,933	0,090	0,0983	10,5
$\alpha = 0^\circ$ $W = 30 \%$	0,2 ... 0,3	0	0	0	0
	0,3 ... 0,4	0	0	0	0
	0,4 ... 0,5	0,560	0,049	0,0548	10,5
$\alpha = 90^\circ$ $W = 5 \%$	0,8 ... 0,9	0	0	0	0
	0,9 ... 1,0	3,853	0,024	0,0289	0,8
	1,0 ... 1,2	2,563	0,013	0,1493	5,8

Из приведенных данных видно, что кривые податливости имеют практически одинаковый вид. Коэффициент вариации взаимных горизонтальных сдвигов  $C_v$  отдельных точек не более 10 %. Экспериментальные значения горизонтальных сдвигов  $J^{II}(t)$  представляли в аналитической форме. Для этого строили графики зависимостей  $\ln a_{\sigma}$  от  $(\sigma - \sigma_0)$ .

Полученные кривые аппроксимировали следующими выражениями для различных серий древесины: В-I ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $W = 30 \%$ ) –  $\ln a_{\sigma} = b_1(\sigma - \sigma_0)$ ; Б-I ( $0^\circ$ , 15 %) –  $\ln a_{\sigma} = b_2(\sigma - \sigma_0)$ ; В-III ( $90^\circ$ , 5 %) –  $\ln a_{\sigma} = b_3(\sigma - \sigma_0)$ .

Коэффициенты  $b_1$ ,  $b_2$  и  $b_3$  определяли методом наименьших квадратов:  $b_1 = 1,867$ ,  $b_2 = 3,600$  и  $b_3 = 8,708$ . По найденным значениям коэффициентов строили обобщенные кривые, экстраполированные с  $J^{II}(t)$  для всех случаев смятия древесины.

Метод НВА применим к древесине, сминаемой вдоль и поперек волокон. Приведенные на рис. 1, 2, а обобщенные кривые, полученные по

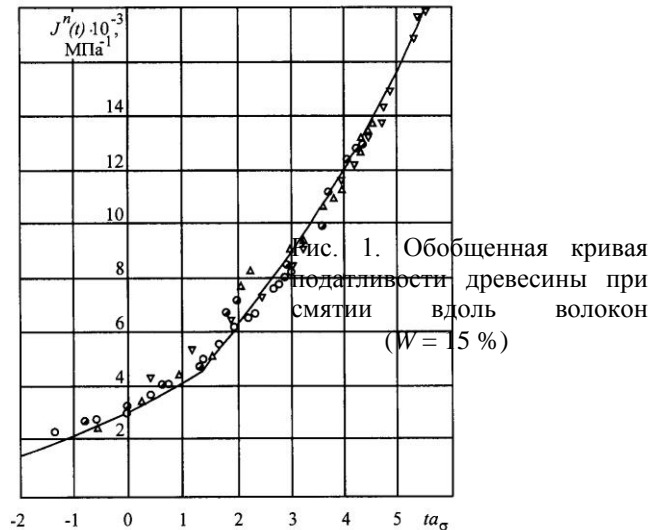


Рис. 1. Обобщенная кривая податливости древесины при смятии вдоль волокон ( $W = 15\%$ )

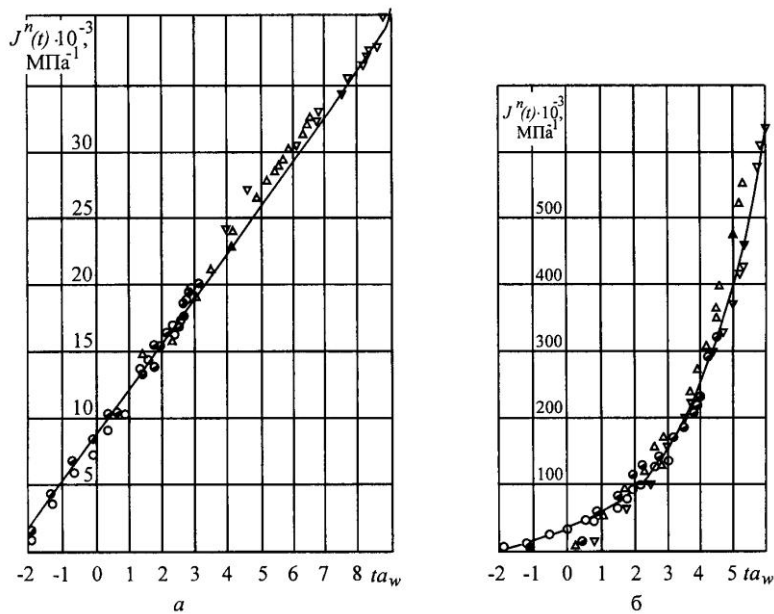


Рис. 2. Обобщенная кривая вязкоупругой податливости древесины при смятии поперек волокон при различной влажности: а – 5 %; б – 15 %

результатам длительных испытаний, моделируют длительную ползучесть для древесины серий: Б-I (время упреждения до 10 лет); В-III (до 100 лет). При этом отмечено хорошее соответствие обобщенных кривых кривым податливости, сдвинутым на величину  $\ln a_\sigma$ . Отклонение опытных точек от построенных обобщенных кривых невелико и среднеквадратическое расхо-

ждение между ними в генеральной совокупности ( $P = 95 \%$ ) не превышает 7,78 %.

Из графика на рис. 2, а видно, что обобщенная кривая для древесины серии В-III также описывается прямой линией:

$$J^n(t) = J_0 + 4ta_\sigma. \quad (2)$$

Коэффициент перед  $ta_\sigma$  равен 4, что почти в три раза превышает коэффициент в формуле (1).

Анализ соотношения (1) и (2) показывает, что физическая нелинейность, описываемая этими уравнениями, проявляется с увеличением угла наклона волокон древесины от 0 до 90 °, причем нелинейность значительно возрастает в интервале 45 ... 90 °. Связь  $J^n(t) - ta_\sigma$  имеет прямолинейный характер, однако указанный способ описания податливости обобщенной кривой не всегда корректен, так как при больших нагрузках происходит ее существенное искривление.

На основании проведенных исследований реологическое соотношение для древесины, сминаемой вдоль волокон при  $W = 15 \%$ , в случае использования непрерывного спектра времени релаксации можно записать в следующем виде:

$$J^n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} L[\ln S, t_0, \sigma_0] \left[ 1 - \exp\left(\frac{-ta_\sigma}{S}\right) \right] d \ln S. \quad (3)$$

При  $b_\sigma = 1$  и  $a_\sigma = f(\sigma - \sigma_0)$  материал относится к классу реологически простых тел, тогда для описания процесса деформирования можно воспользоваться соотношением

$$\varphi[\varepsilon(t)] = \sigma(t') + \int_{\sigma}^t K(t' - s') \sigma(s') ds', \quad (4)$$

где  $t' = \int_0^t a_\sigma(\tau) d\tau$ .

Новое приведенное время выражается формулой

$$\ln ta_\sigma = \ln t + \ln ta_\sigma.$$

Следовательно, обобщенная кривая, полученная методом НВА, удовлетворительно моделирует длительную ползучесть древесины при смятии.

Таким образом, метод НВА может быть рекомендован для экспресс-анализа деформативности материала деревянных конструкций на нагельных соединениях при различных режимах эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варфоломеев, Ю.А. Совершенствование конструктивных решений деревянных клееных элементов для пространственных конструкций [Текст] / Ю.А. Варфоломеев, А.В. Вешняков // Информ. листок Арханг. ЦНТИ. – 1996. – № 195–96.
2. Колтунов, М.А. К вопросу исследования одномерной задачи нелинейной ползучести [Текст] / М.А. Колтунов // Механика полимеров. – 1996. – № 5. – С. 678–687.

3. Колтунов, М.А. Метод аппроксимаций Ильюшина в применении к средам с нестабильными свойствами [Текст] / М.А. Колтунов, И.Е. Трояновский // Механика полимеров. – 1970. – № 3. – С. 411–419.

4. Москвитин, В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов [Текст] / В.В. Москвитин. – Наука, 1972. – 327 с.

5. Работнов, Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 752 с.

6. Работнов, Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел [Текст] / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1977. – 384 с.

7. СНиП II-25–80. Деревянные конструкции. [Текст] – М.: Стройиздат, 1983. – 31с.

С.-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет

Поступила 30.12.04

*N.V. Sheshunova, B.K. Mikhajlov*

### **Development of Methods for Forecasting Wood Deformability Taking into Account Humidity**

It is found out that the method of stressed-temporary analogy could be recommended for express-analysis of wood deformability in main joining on pegs of wooden structures under different operation modes.

---