

**Моделирование ползучести деревянной балки прямоугольного сечения
при длительной статической нагрузке**

Б.М. Языев¹, Сун Сюаньчжэнь¹, М.А. Магомедов², С.В. Литвинов¹, В.В. Кузнецов¹

¹Донской государственной университет,

¹344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, Россия

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026, РД, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. В зависимости от уровня напряжений, работа деревянных балок при длительной нагрузке характеризуется как линейной, так и нелинейной ползучестью. Это показали многочисленные экспериментальные исследования древесины. Однако теоретического описание данных процессов мало изучено или представлено крайне редко. Отсюда следует, что одним из приоритетных направлений в расчетах элементов деревянных конструкций является вывод разрешающих уравнений линейной или нелинейной ползучести для различных видов напряженно-деформированного состояния. **Метод.** В качестве соотношений, устанавливающих связь между напряжениями и деформациями, используются уравнение Максвелла-Томсона. Методика апробирована путем сравнения решения с расчетом известных исследователей. Приведен пример расчета для различных граничных условий закрепления балки прямоугольного поперечного сечения, загруженной равномерно- распределенной нагрузкой. Величина прогиба определяется методом сеток. **Результат.** Разработана программа для расчета в пакете MATLAB с возможностью вариации исходных данных и выводом графика зависимости перемещений, изгибающего момента от времени. Приведено сравнение максимальной величины прогиба с аналитическим решением. Отмечено, что напряжения практически не меняются в процессе ползучести. **Вывод.** Предложенный подход может быть применен к анализу напряженно-деформированного состояния и несущей способности деревянных балок произвольного сечения. Ограничений по граничным условиям и вида нагружения нет, а материалом балки может быть не только дерево, но и стеклопластик.

Ключевые слова: ползучесть древесины, относительная деформация, уравнение связи Максвелла-Томсона, изгибающие моменты, переменная жесткость

Для цитирования: Б.М. Языев, Сун Сюаньчжэнь, М.А. Магомедов, С.В. Литвинов, В.В. Кузнецов. Моделирование ползучести деревянной балки прямоугольного сечения при длительной статической нагрузке. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3): 227-236. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-227-236

Simulation of creep of a rectangular wooden beam under prolonged static load

B.M. Yazyev¹, Song Xuanzhen¹, M.A. Magomedov², S.V. Litvinov¹, V.V. Kuznetsov¹

¹Don State University, 1344003,

¹Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, Russia

²Daghestan State Technical University,

²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. Depending on the stress level, the operation of wooden beams under prolonged load is characterized by both linear and nonlinear creep. This has been shown by numerous experimental studies of wood. The theoretical description of these processes is poorly studied or presented extremely rarely. One of the priority areas in the calculations of

wooden structure elements is the derivation of resolving equations of linear or nonlinear creep for various types of stress-strain state. **Method.** The Maxwell-Thomson equations are used as relations establishing the relationship between stresses and deformations. The technique was tested by comparing the solution with the calculation of well-known researchers. An example of calculation is given for various boundary conditions for fixing a beam of rectangular cross-section loaded with a uniformly distributed load. The deflection value is determined by the grid method. **Result.** A program has been developed for calculating in the MATLAB package with the possibility of varying the initial data and displaying a graph of the dependence of displacement, bending moment on time. The comparison of the maximum deflection value with the analytical solution is given. It is noted that the stresses practically do not change during creep. **Conclusion.** The proposed approach can be applied to the analysis of the stress-strain state and bearing capacity of wooden beams of arbitrary cross-section. There are no restrictions on boundary conditions and loading type, and the beam material can be not only wood, but also fiberglass.

Keywords: wood creep, relative deformation, Maxwell-Thomson constraint equation, bending moments, variable stiffness

For citation: B.M. Yazyev, Xuanzhen Song, M.A. Magomedov, S.V. Litvinov, V.V. Kuznetsov. Simulation of creep of a rectangular wooden beam under prolonged static load. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(3): 227-236. DOI:10.21822 /2073-6185-2024-51-3-227-236

Введение. Исследования работы древесины во времени можно разделить на два направления: длительная прочность древесины и ползучесть древесины. Оба направления исследований развиваются достаточно обособленно друг от друга, и большая часть трудов посвящена длительной прочности. Длительная нелинейность деформирования древесины исследована мало. Еврокод 5 [1,2] устанавливает обязательный принцип в расчете по предельным состояниям деревянных конструкций - учет ползучести древесины. Отечественный норматив ползучесть древесины в расчетных моделях конструкций не учитывает.

Современные модели ползучести древесины основаны на линейных теориях. Мгновенные свойства древесины в указанных исследованиях ползучести установлены на основе закона Гука, что не соответствует нелинейной диаграмме упругопластического типа, присущей сжатой древесине. На это обстоятельство обратил внимание К.П. Пятикрестовский [3,4]. Учет же мгновенных упругопластических деформаций в моделях ползучести древесины является сложной проблемой [5-9]. Без этого невозможно решить в рамках тех моделей ползучести древесины, которые разрабатываются в последние годы за рубежом и основываются на последовательном соединении различных линейных моделей [10-14].

Постановка задачи. Часто в уравнениях связи (состояния) для деревянных брусьев используется методика, учитывающая сложность процесса деформирования материала во времени с помощью разбиения процессов деформирования на соответствующие стадии, что позволяет заменить сложную нелинейную связь между напряжениями и деформациями кусочно-линейными зависимостями [10]. Эти этапы с их характерными особенностями можно наглядно продемонстрировать на рис. 1.

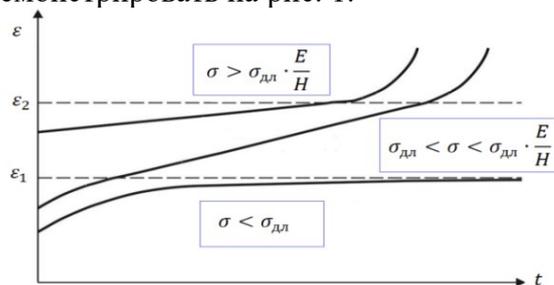


Рис. 1. Кривые деформирования при длительном действии статической нагрузки
Fig. 1. Deformation curves under prolonged action of static load

Из рис. 1 можно выделить [11]:

Первый этап деформирования – ползучесть является обратимой, подчиняется основным положениям линейной теории ползучести и описывается уравнением, называемым упрощенным законом линейной ползучести (уравнение Максвелла-Томсона)

$$n \cdot E_0 \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + H \varepsilon = \sigma + n \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (1)$$

где E_0 – мгновенный начальный модуль деформаций, равный среднему значению модуля упругости (приложение СП 64.13330.2017); $H = (0,6 + 0,75) \cdot E_0$ – константа, имеющая физический смысл длительного модуля деформаций; σ, ε – напряжения и относительные деформации (текущие); n – время релаксации.

Второй этап деформирования – стадия установившейся ползучести

$$n \cdot E_0 \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \sigma + n \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \sigma_{дл} \quad (2)$$

Третий этап деформирования – стадия с возрастающей скоростью деформирования

$$n \cdot E_0 \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - B \cdot \varepsilon = \sigma + n \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \sigma_{pp} \quad (3)$$

где B – константа, имеющая смысл модуля деформации при критическом нарастании деформаций; σ_{pp} – кратковременный предел прочности, равный нормативному сопротивлению древесины (приложение В СП 64.13330.2017); $\sigma_{дл} = 0,5 \cdot \sigma_{pp}$ – длительный предел прочности.

В настоящей статье рассматривается первый этап деформирования.

Методы исследования. Рассмотрим расчетные схемы, приведенные на рис. 2.

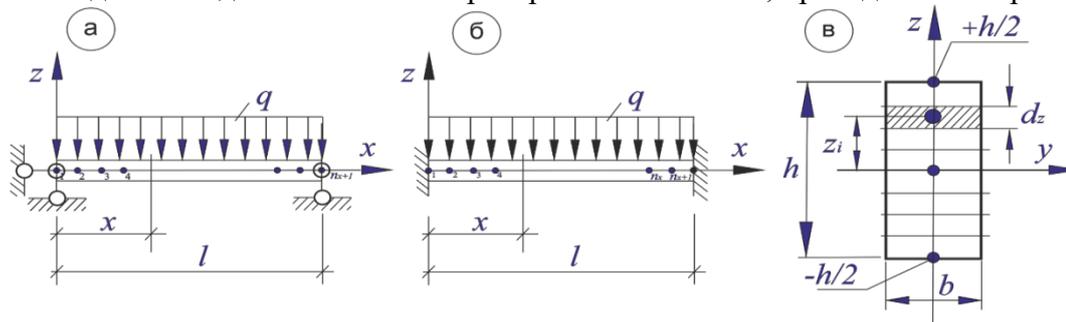


Рис. 2. Расчетные схемы задачи для балки прямоугольного сечения

Fig. 2. Calculation schemes of the problem for a rectangular beam

Полные деформации во времени будем представлять, как сумму составляющих упругой ε_{el} и деформации ползучести ε_{cr} .

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{cr} = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{cr} \quad (4)$$

Рассматривая геометрическую сторону задачи, полную деформацию можно представить, как:

$$\varepsilon = -z \frac{d^2 x}{dx^2} \quad (5)$$

Напряжения можно представить через полные деформации, используя соотношения (4) и (5):

$$\sigma = -E \cdot \left(z \frac{d^2 w}{dx^2} + \varepsilon_{cr} \right) \quad (6)$$

Интегральная связь изгибающего момента с нормальным напряжением имеет вид:

$$M = - \int_A \sigma \cdot z dA = - \int_A -E \cdot \left(z \frac{d^2x}{dx^2} + \varepsilon_{cr} \right) z dA \quad (7)$$

Раскрыв скобки в подинтегральном выражении (7), запишем:

$$M = E \left(\int_A z^2 dA \cdot \frac{d^2w}{dx^2} + \int_A \varepsilon_{cr} z dA \right) \quad (8)$$

Первый интеграл есть не что иное как осевой момент инерции:

$$I_y = \int_A z^2 dA = b \int_{-h/2}^{+h/2} z^2 dz = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Второй интеграл запишем как:

$$M_{cr} = \int_A \varepsilon_{cr} z dA = Eb \int_{-h/2}^{+h/2} z \cdot \varepsilon_{cr} dz \quad (9)$$

В итоге разрешающее уравнение принимает вид:

$$M = EI \cdot \frac{d^2w}{dx^2} + M_{cr} \quad (10)$$

Подставив в уравнение состояния (1), полные деформации из соотношения (4), получим:

$$n \cdot E \cdot \left(\frac{1}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} \right) + H \cdot \left(\frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{cr} \right) = \sigma + n \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t}$$

Или скорость деформации ползучести окончательно:

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} = \frac{1}{n \cdot E} \left[\sigma \left(1 - \frac{H}{E} \right) - H \cdot \varepsilon_{cr} \right];$$

Для вычисления деформаций ползучести вводится равномерная сетка по времени. Величина ε_{cr} в момент времени $(t + \Delta t)$ вычисляется на основе метода Эйлера [6]:

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} \approx \frac{\varepsilon_{cr,t+\Delta t} - \varepsilon_{cr,t}}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{cr,t+\Delta t} = \varepsilon_{cr,t} + \frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} \Delta t. \quad (11)$$

Аналогичный подход для решения задач ползучести применяется в работах [7–10]. Конечно-разностная аппроксимация уравнения (10) на основе рис. (рис.2.а) примет вид:

$$\frac{w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}}{\Delta x^2} = \frac{1}{EI} (M_i + M_{cr,i}) \quad (12)$$

В качестве граничных условий выступает равенство нулю прогиба на опорах:

$$w_1 = 0; \quad w_{n+1} = 0;$$

Разбив балку на n отрезков сведём задачу к системе линейных алгебраических уравнений, имеющей вид:

$$[A] \cdot \{w\} = \{B\} \quad (13)$$

где $[A]$ – матрица коэффициентов при w_i размерностью $(n + 1; n + 1)$.

$$[A] = \frac{1}{\Delta x^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_n & b_n & c_n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

где

$$a_i = 1; b_i = -2; c_i = 1;$$

$\{w\}$ – вектор неизвестных узловых перемещений; $\{w\} = \{w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n\}^T$;

$\{B\}$ – вектор правой части (свободных членов); $\{B\} = \{0 \ f_1 \ f_2 \ \dots \ w_n \ 0\}^T$;

$$f_i = \frac{M_i}{EI} - \frac{M_{cr}}{EI}; M_i = \frac{qx}{2}(l-x), \quad (0 < x < l);$$

Что касается M_{cr} , то определив из (11) значение $\varepsilon_{cr,i}$ для времени $t + \Delta t$, можно вычислить интеграл (9) численно:

$$\int_A \varepsilon_{cr} z dA = \Delta z \left(\frac{\varepsilon_{cr,0}}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{cr,i} + \frac{\varepsilon_{cr,n}}{2} \right);$$

где

Δz – шаг интегрирования;

$\varepsilon_{cr,0}$ и $\varepsilon_{cr,n}$ – начальное и конечное значения функции;

ε_{cr} ; $\varepsilon_{cr,i}$ – промежуточные значения функции.

Что касается схемы рис.2 б, то здесь граничные условия для такой задачи имеют вид:

$$w_1 = 0; \varphi_1 = \left. \frac{dw}{dx} \right|_1 = 0; \quad w_{n+1} = 0; \varphi_{n+1} = \left. \frac{dw}{dx} \right|_{n+1} = 0;$$

Четыре граничных условия не позволяют использовать дифференциальное уравнение второго порядка (10).

Для удовлетворения всем граничным условиям уравнение (10) нужно дважды продифференцировать по x :

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{1}{EI} \left(-q - \frac{d^2 M_{cr}}{dx^2} \right) \quad (14)$$

В уравнении (14) нагрузка q считается положительной, если она направлена вверх. В рассматриваемом случае нагрузка направлена вниз, поэтому перед первым слагаемым в скобках (14) знак “–”.

Разностная аппроксимация уравнения (14) записывается в виде:

$$\frac{w_{i+2} - 4w_{i+1} + 6w_i + 4w_{i-1} + w_{i-2}}{\Delta x^4} = \frac{-qi}{EI} - \frac{1}{EI} \left(\frac{M_{cr,i+1} - 2M_{cr,i} + M_{cr,i-1}}{\Delta x^2} \right); i = 2, 3, 4, \dots n \quad (15)$$

При составлении уравнения (14) для узлов 2 и n возникает необходимость определения прогибов в так называемых законтурных точках, которые имеют индексы 0 и $n+2$ согласно [10]. Это касается и граничных условий.

Как и для балки с шарнирным обиранием, задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений, имеющей вид (13):

где $[A]$ – матрица коэффициентов при w_i размерностью $(n + 1; n + 1)$.

$$[A]^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & -4 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

где

$$[A] = \frac{1}{\Delta x^4} \cdot [A]^*$$

$\{w\}$ – вектор неизвестных узловых перемещений; $\{w\} = \{w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n\}^T$;

$\{B\}$ – вектор правой части (свободных членов); $\{B\} = \{0 \ f_1 \ f_2 \ \dots \ w_n \ 0\}^T$;

$$f_i = -\frac{q_i}{EI} - \frac{1}{EI} \left(\frac{M_{cr,i+1} - 2M_{cr,i} + M_{cr,i-1}}{\Delta x^2} \right); \quad (0 < x < l);$$

Обсуждение результатов. Расчет был выполнен в программном комплексе MATLAB. Из приведенной зависимости (рис.3) видно, что деформации резко возрастают в период времени от 0 до 80 суток, а затем приходят к конечному значению.

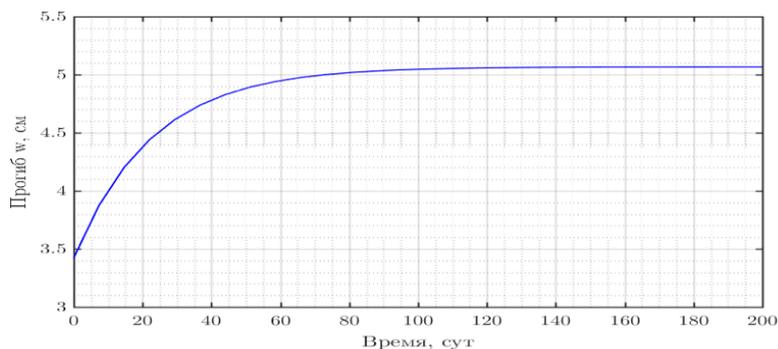


Рис. 3. График роста максимального прогиба во времени. Схема «шарнир-шарнир»
 Fig. 3. Graph of maximum deflection growth over time. “Hinge-hinge” scheme

Для определения максимального прогиба в упругой постановке для шарнирно-опертой балки при действии равномерно-распределенной нагрузки из курса сопротивления материалов:

$$w_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot I} \quad (16)$$

Авторы работы [1] считают, что для определения прогиба в конце процесса ползучести достаточно заменить мгновенный модуль упругости E на длительный H . С этим утверждением можно согласиться, но оно работает не для всех зависимостей уравнения связи между деформациями и напряжениями.

При подстановке заданных размеров балки получим:

$$w_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{2 \cdot 6^4}{10^7 \cdot \left(\frac{0,1 \cdot 0,2^3}{12} \right)} = 0,0506 \text{ м.} \quad (17)$$

Графическое значение w_{max} и значение w_{max} , вычисленное по (16) имеют погрешность $\Delta = 1 \cdot 10^{-7}\%$. Полученные графики зависимости максимального прогиба от времени и распределения изгибающего момента во времени приведены на рис. 4 и рис 5, как для условия «Шарнир-Шарнир», так и для «Заделка-Заделка»

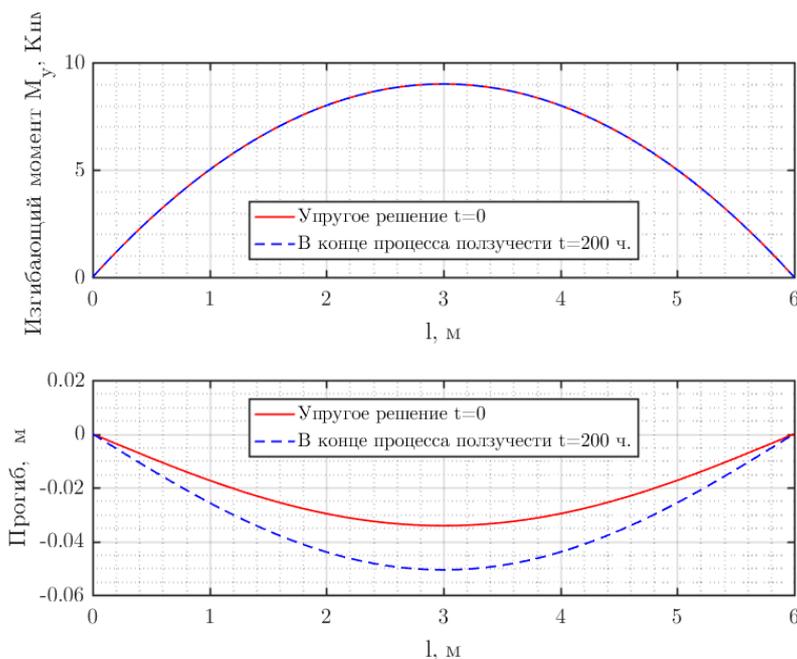


Рис. 4. График изменения изгибающего момента и прогиба по длине балки

1 – распределение изгибающего момента по длине балки в начале и конце процесса ползучести;

2 – распределение прогиба по длине балки в начале и в конце процесса ползучести

Схема – «Шарнир-Шарнир»

Fig. 4. Graph of the change in bending moment and deflection along the length of the beam

1 – distribution of bending moment along the beam length at the beginning and end of the creep process;

2 – distribution of deflection along the beam length at the beginning and end of the creep process

Scheme – “Hinge-Hinge”

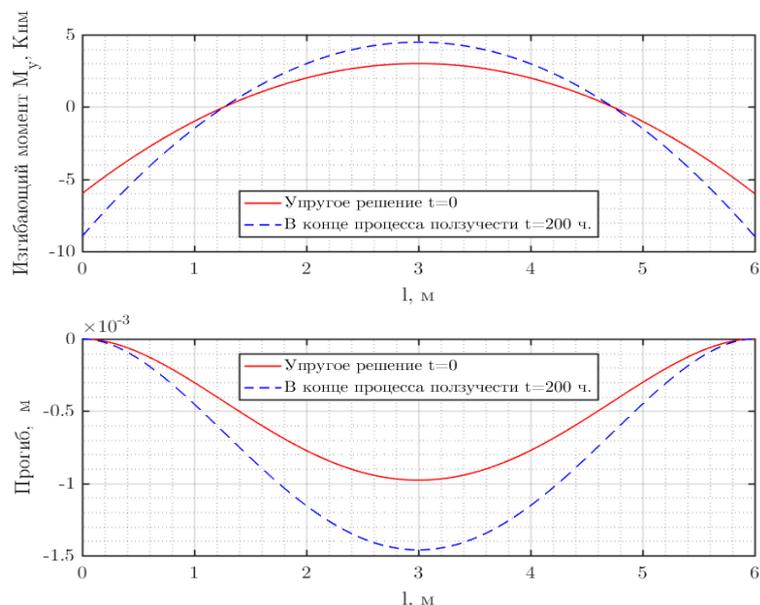


Рис. 5. График изменения изгибающего момента и прогиба по длине балки

1 – распределение изгибающего момента по длине балки в начале и конце процесса ползучести;

2 – распределение прогиба по длине балки в начале и в конце процесса ползучести

Схема – «Заделка-Заделка»

Fig. 5. Graph of the change in bending moment and deflection along the length of the beam

1 – distribution of bending moment along the length of the beam at the beginning and end of the creep

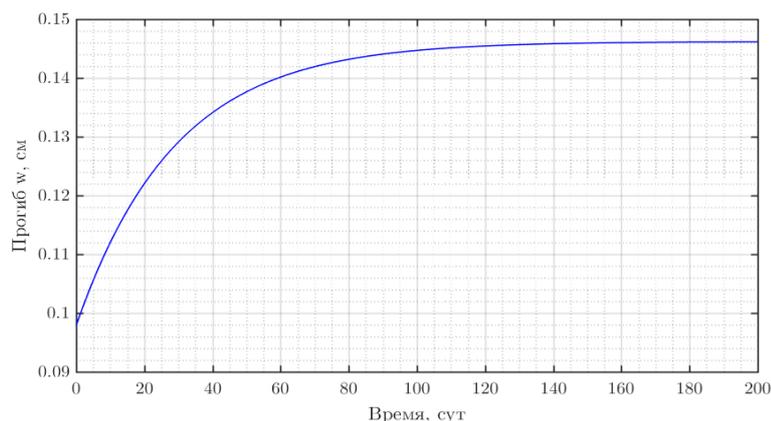
process;

2 – distribution of deflection along the length of the beam at the beginning and end of the creep

process

Scheme – “Seal-Seal”

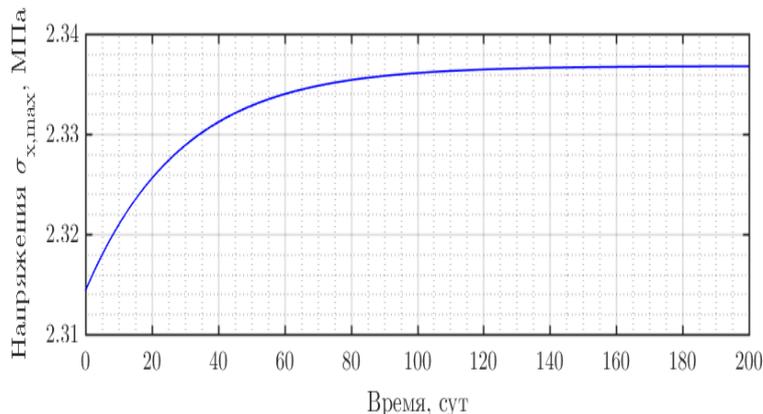
График изменения прогиба во времени представлен графиком рис.6. Здесь отметим, что на постоянное плато прогиб выходит уже только на времени 120 часов.



**Рис. 6. График роста максимального прогиба во времени
 Схема «шарнир-шарнир»**

**Fig. 6. Graph of maximum deflection growth over time
 “Hinge-hinge” scheme**

Отметим также, что при выбранном законе ползучести напряжения во времени не меняются (рис.7).



**Рис. 7. Зависимость нормального напряжения от времени
 Fig. 7. Dependence of the normal stress on time**

Вывод. Если делать заключение по линейной ползучести, то в данной области при $\sigma = const$ можно принять предложенную Ю.М. Ивановым [6] зависимость:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t_0) \cdot (1 + bt^{0.21}), \quad \text{где } b = \frac{10^{-2}}{0,735 - 0,02086 \cdot W}; \quad (18)$$

W – влажность древесины, %

Эта зависимость можно принять вместо решения уравнения (1).

Если $\sigma < \sigma_{дл}$ то деформации не превысят величины $\varepsilon_1 = \sigma_{дл}/H$ при сколь угодно большой продолжительности действия нагрузки, то вторая стадия деформирования не наступит вообще.

Библиографический список:

1. Ягнюк Б. Н. Теоретические основы проектирования деревянных конструкций по нормам европейского союза — Еврокоду 5 / Б. Н. Ягнюк. – Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 140с.
2. BS EN 1995-1-1:2004+A2:2014 / Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций.
3. Пятикрестовский К.П., Соколов Б.С. Численные исследования напряженно-деформированного состояния модели шатрового покрытия при длительных ступенчато возрастающих нагрузках. Строительство и реконструкция. Известия, Орел. ГТУ. – 2009. С. 33–38.

4. Пятикрестовский К.П. Нелинейные методы механики в проектировании современных деревянных конструкций: Монография / К.П. Пятикрестовский: М-во образования и науки РФ, МГСУ, 2004. – 320 с.
5. Вареник, К. А. Расчет центрально-сжатый деревянных элементов с учетом ползучести: дис. ... канд. тех. Наук / К. А. Вареник. – Великий Новгород, 2015. – 167 с.
6. Шорстов, Р.А. Совершенствование расчета на устойчивость сжатых деревянных стержней переменного по длине прямоугольного сечения /Р.А. Шорстов, С.Б. Языев, А.С. Чепурненко // Системные технологии. – 2023. – № 1. – С. 140-150.
7. Погорельцев А.А., Пятикрестовский К.П. Вопросы дальнейшего развития конструкций из дерева и пластмасс и совершенствование норм проектирования конструкций из древесины // ПГС. – 2019. – № 2. С.14–18
8. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. – М.: Стройиздат, 1968. – 416 с
9. Лапина, А. П. Совершенствование энергетического метода в расчетах балок на устойчивость плоской формы изгиба [Текст] / А. П. Лапина, А. С. Чепурненко, И. М. Зотов, Б. М. Языев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – № 4 (77). – С. 5-16.
10. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики. – М.: Стройиздат, 1978. – 208 с.
11. Иванов Ю.М. Длительная несущая способность деревянных конструкций. – Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1972. – № 11. С. 6–12.
12. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Вишталов Р.И. Оптимизация параметров конструкций путем применения сталей различной прочности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(2):232-240.
13. Гатиев М.Ш., Языев Б.М., Иванова Ю.П., Ключев С.В. Ползучесть замкнутого цилиндрического резервуара при гидростатическом давлении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023;50(4):184-190.
14. Агаханов Э.К., Курачев Р.М., Чепурненко А.С., Языев С.Б. Моделирование изменения деформационных свойств бетона в защитных конструкциях реакторов АЭС под действием ионизирующего излучения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;40(1):8-14.

References:

1. Yagnyuk B. N. Theoretical foundations of design of wooden structures according to the standards of the European Union — Eurocode 5 / B. N. Yagnyuk. - Moscow-Berlin: Direct-Media, 2015;140.
2. BS EN 1995-1-1:2004+A2:2014 / Eurocode 5. Design of wooden structures.
3. Pyatikrestovskiy K. P., Sokolov B. S. Numerical studies of the stress-strain state of the hipped roof model under long-term stepwise increasing loads. Construction and reconstruction. Izvestia, Orel. GTU. 2009; 33-38. (In Russ)
4. Pyatikrestovskiy K. P. Nonlinear methods of mechanics in the design of modern wooden structures: Monograph: Ministry of Education and Science of the Russian Federation, MGSU, 2004;320. (In Russ)
5. Varenik, K. A. Calculation of centrally compressed wooden elements taking into account creep: dis. ... Cand. of Technical Sciences Veliky Novgorod, 2015; 167. (In Russ)
6. Shorstov, R. A. Improving the calculation of the stability of compressed wooden rods of variable length rectangular cross-section / R. A. Shorstov, S. B. Yazyev, A. S. Chepurnenko. *System technologies*. 2023; 1: 140-150. (In Russ)
7. Pogoreltsev A. A., Pyatikrestovsky K. P. Issues of further development of structures made of wood and plastics and improvement of design standards for structures made of wood. *PGS*. 2019; 2:14–18 (In Russ)
8. Rzhantsyn A. R. Creep Theory. M.: Stroyizdat, 1968; 416. (In Russ)
9. Lapina, A. P. Improving the Energy Method in Calculating Beams for Plane Bending Stability [Text] A. P. Lapina, A. S. Chepurnenko, I. M. Zotov, B. M. Yazyev. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2019;4 (77): 5–16. (In Russ)
10. Lukash P. A. Fundamentals of Nonlinear Structural Mechanics. M.: Stroyizdat, 1978:208. (In Russ)
11. Ivanov Yu. M. Long-term load-bearing capacity of wooden structures. *News of universities. Construction and architecture*. 1972; 11: 6–12. (In Russ)
12. Yusupov A.K., Muselemov H.M., Vishtalov R.I. Optimization of structural parameters by using steels of different strengths. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(2): 232–240. (In Russ)
13. Gatiev M.Sh., Yazyev B.M., Ivanova Yu.P., Klyuyev S.V. Creep of a closed cylindrical tank under hydrostatic pressure. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023;50(4):184–190. (In Russ)
14. Agakhanov E.K., Kurachev R.M., Chepurnenko A.S., Yazyev S.B. Modeling of changes in deformation properties of concrete in protective structures of nuclear power plant reactors under the influence of ionizing radiation. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2016;40(1):8-14. (In Russ)

Сведения об авторах:

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; ps62@yandex.ru; ORCID 0000-0002-5205-1446

Сун Сюаньчжэнь, аспирант кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; suncheng@hit.edu.cn

Магомедов Марсель Айдемирович, соискатель кафедры «Транспортных сооружений и строительных материалов»; marsmag05@ya.ru

Литвинов Степан Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; ps62@yandex.ru; ORCID 0000-0001-5729-1425,

Кузнецов Владимир Вячеславович, аспирант кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; ibm2225101@gmail.com

Information about authors:

Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ps62@yandex.ru ; ORCHID 0000-0002-5205-1446

Xuanzhen Song, Postgraduate student, Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; suncheng@hit.edu.cn;

Marcel A. Magomedov, Applicant, Department of Transport Structures and Building Materials; marsmag05@ya.ru

Stepan V. Litvinov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ps62@yandex.ru ; ORCHID 0000-0001-5729-1425,

Vladimir V. Kuznetsov, Postgraduate student, Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ibm2225101@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 25.06.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 18.07.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 18.07.2024.