**Литература**

1. Систер В.Г., Миташова Н.И., Каверина М.Г., Башкатова И.А. Очистка сточных вод автомобильного завода // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ». 2014. Т. 2. № 3 (17). С. 13-16.
2. Кац А.М. Окраска автомобилей на АТП. – М.: Транспорт, 1986.
3. http://www.wikipedia.org
4. Муравьев А.Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. – СПб.: Крисмас +, 2004.
5. Кожинов В.Ф. Очистка питьевой и технической воды, примеры и расчеты. – М., 1971.
6. СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения.
7. Алферова Л.А., Нечаев А.П. Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий, комплексов и районов. – М., 1984.
8. Аюкаев Р.И., Мельцер В.З. Производство и применение фильтрующих материалов для очистки воды. – Л., 1985.


## *Компьютерный анализ неустановившейся ползучести стержневых элементов конструкций*


Д.т.н. проф. Луганцев Л.Д.

*Университет машиностроения*

*8(499)267-16-33, cadsystems@mail.ru*



*Аннотация.* Изложены метод и алгоритм компьютерного анализа вязкоупругого деформирования бруса в нестационарном температурном поле. Представлены сведения о программной реализации предложенного метода расчета. Приведен пример расчета процесса неустановившейся ползучести бруса при термомеханическом воздействии.



*Ключевые слова: стержневая система, термомеханическое воздействие, вязкоупругое деформирование, ползучесть, компьютерный анализ.*


Рассматривается вязкоупругое деформирование стержневого элемента в форме бруса с переменным поперечным сечением $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}(z)$ при нестационарном температурном воздействии. Координатная ось $z$ проходит через центр тяжести бруса, ось $\boldsymbol{y}$ лежит в плоскости изгиба. Брус нагружен распределенной по оси $\boldsymbol{z}$ поперечной нагрузкой $q_z(z)$, осевой нагрузкой $q_y(z)$, осевым усилием $P_z$, поперечным усилием $P_y$ и нагрет до температуры $\boldsymbol{T}(z, y)$. Примерная расчетная схема рассматриваемой конструкции показана на рисунке 1.

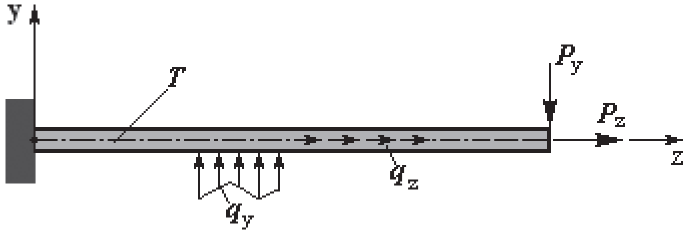


**Рисунок 1. Расчетная схема стержневого элемента**

Силовые нагрузки достигают заданных значений в начальный момент времени $\tau_0 = 0$ и в дальнейшем при развитии процесса ползучести не изменяются. Температура $\boldsymbol{T}(z, y)$ в общем случае изменяется во времени по ступенчатому закону. Полагаем, что рассматриваемая конструкция является статически определимой и граничные условия на торцах бруса заданы. Влиянием касательных напряжений на изгиб бруса пренебрегаем, – при изгибе поперечные сечения бруса остаются плоскими. В процессе ползучести распределение напряжений и деформаций по высоте поперечного сечения с течением времени изменяется.

Разрешающую систему дифференциальных уравнений для бруса в начальный момент времени $\tau_0 = 0$ записываем в виде:

$$
\begin{aligned}
&\frac{dN(z)}{dz} = -q_z(z),\\
&\frac{dQ(z)}{dz} = -q_y(z),\\
&\frac{dM(z)}{\partial z} = Q(z),\\
&\frac{du(z)}{\partial z} = \varepsilon^0(z) + \varepsilon_T^0(z),\\
&\frac{dw(z)}{\partial z} = -\vartheta(z),\\
&\frac{d\vartheta(z)}{\partial z} = \chi(z) + \chi_T(z),
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где $N(z)$ – осевое усилие в брусе; $Q(z)$ – поперечное усилие в брусе; $M(z)$ – изгибающий момент в брусе; $u(z)$ – осевое перемещение центра тяжести; $w(z)$ – прогиб; $\theta(z)$ – угол поворота поперечного сечения бруса; $\varepsilon^0(z) = \frac{1}{c_0}\left(N(z) - c_1\chi(z)\right)$ – упругая составляющая осевой деформации; $\varepsilon_T^0(z) = \frac{1}{c_0}\left(d_0 - c_1\chi_T(z)\right)$ – температурная составляющая осевой деформации; $\chi(z) = \frac{1}{\Delta}\left(c_0 M(z) - c_1 N(z)\right)$ – упругая составляющая кривизны оси бруса; $\chi_T = \frac{1}{\Delta}\left(d_1 c_0 - d_0 c_1\right)$ – температурная составляющая кривизны оси бруса;

$c_m = \int\limits_F E y^m dy$, $(m = 0,\ 1,\ 2)$; $d_m = \int\limits_F E\alpha T y^m dy$, $(m = 0,\ 1)$; $E = E\left(T(z,y)\right)$;

$$\Delta = c_0 c_2 - c_1^2. \tag{2}$$

Уравнения (1) описывают упругую деформацию бруса в начальный момент времени $\tau_0 = 0$. Выполнив решение системы (1) при заданных граничных условиях на торцах бруса, определяем все компоненты начального напряженно-деформированного состояния бруса в момент времени $\tau_0 = 0$, в том числе напряжения $\sigma(z,y)$ в брусе, а также параметры $\varepsilon^0(z)$, $\chi(z)$.

Рассмотрим процесс развития деформаций ползучести при $\tau > 0$.

Скорость изменения полной деформации в точке $(z,y)$ бруса

$$\dot{\varepsilon}(z,y) = \dot{\varepsilon}_e(z,y) + \dot{\varepsilon}_c(z,y),$$

где $\dot{\varepsilon}_e(z,y) = \frac{\dot{\sigma}(z,y)}{E}$ – скорость изменения упругой деформации; $\dot{\varepsilon}_c(z,y)$ – скорость изменения деформации ползучести. Точкой обозначено дифференцирование по времени $\tau$.
Согласно теории ползучести [1], компоненты скорости ползучести:

$$v_{ij}^c = \frac{3s_{ij}}{2\sigma_i} v_i^c ,$$

где $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_0$ – составляющие девиатора напряжений; $\sigma_0 = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$;

$\sigma_i$ – интенсивность напряжений; $v_i^c$ – интенсивность скорости деформаций ползучести.

При расчетах на ползучесть используется обобщенная зависимость $v_i^c = v_i^c(\sigma_i, T)$, которая совпадает с экспериментальной зависимостью $v_c = v_c(\sigma, T)$.

В случае одноосного напряженного состояния $s_{11} = \frac{2}{3}\sigma_{11} = \frac{2}{3}\sigma$, $\sigma_i = \sigma$, $v_{11}^c = v_c(\sigma, T)$.

Таким образом, скорость деформации ползучести в брусе

$$\dot{\varepsilon}_c(z, y) = v_c(\sigma(z, y), T). \tag{3}$$

В силу гипотезы плоских сечений

$$\dot{\varepsilon}(z, y) = \dot{\varepsilon}^0(z) + y\dot{\chi}(z), \tag{4}$$

где $\dot{\varepsilon}^0 = \dot{\varepsilon}^0(z)$ – скорость изменения линейной деформации оси бруса,

$\dot{\chi} = \dot{\chi}(z)$ – скорость изменения кривизны оси бруса.

Таким образом, в рассматриваемой точке $(z, y)$ бруса:

$$\dot{\sigma}(z, y) = E\dot{\varepsilon}^0(z) + Ey\dot{\chi}(z) - Ev_c(\sigma(z, y), T). \tag{5}$$

Следовательно, в поперечном сечении $z$ бруса:
скорость изменения нормального усилия

$$\begin{aligned} \dot{N}(z) &= \int_F \dot{\sigma}(z, y)\,dy = \dot{\varepsilon}^0(z)\int_F E\,dy + \dot{\chi}(z)\int_F Ey\,dy - J_{0c}(z) = \\ &= c_0 \cdot \dot{\varepsilon}^0(z) + c_1 \cdot \dot{\chi}(z) - J_{0c}(z); \end{aligned} \tag{6}$$

скорость изменения изгибающего момента

$$\begin{aligned} \dot{M}(z) &= \int_F \dot{\sigma}(z, y)\,y\,dy = \dot{\varepsilon}^0(z)\int_F Ey\,dy + \dot{\chi}(z)\int_F Ey^2\,dy - J_{1c}(z) = \\ &= c_1 \cdot \dot{\varepsilon}^0(z) + c_2 \cdot \dot{\chi}(z) - J_{1c}(z), \end{aligned} \tag{7}$$

где

$$\begin{aligned} J_{0c}(z) &= \int_F Ev_c(\sigma(z, y), T)\,dy, \\ J_{1c}(z) &= \int_F Ev_c(\sigma(z, y), T)\,y\,dy. \end{aligned} \tag{8}$$

Так как по условию задачи рассматриваемая конструкция статически определима, а внешние нагрузки и температура не изменяются на стадии развития деформаций ползучести, заключаем, что внутренние усилия в брусе в процессе ползучести сохраняют свои начальные значения, т.е.

$$\dot{N}(z) = 0, \quad \dot{Q}(z) = 0, \quad \dot{M}(z) = 0.$$

Принимая во внимание уравнения (6) и (7), получим

$$\begin{aligned} c_0 \cdot \dot{\varepsilon}^0(z) + c_1 \cdot \dot{\chi}(z) - J_{0c}(z) &= 0, \\ c_1 \cdot \dot{\varepsilon}^0(z) + c_2 \cdot \dot{\chi}(z) - J_{1c}(z) &= 0. \end{aligned} \tag{9}$$

Решая систему (8) относительно $\dot{\varepsilon}^0$ и $\dot{\chi}$, находим:

$$\dot{\varepsilon}^0(z) = \frac{1}{\Delta}\left(c_2 J_{0c}(z) - c_1 J_{1c}(z)\right),$$
$$\dot{\chi}(z) = \frac{1}{\Delta}\left(c_0 J_{1c}(z) - c_1 J_{0c}(z)\right), \tag{10}$$

где $\Delta$ определяется формулой (2).

Скорость изменения напряжений в брусе вычисляем по формуле (5).

Дифференцируя по параметру $\tau$ последние три уравнения системы (1), получим с учетом соотношений (10) систему уравнений для определения скорости перемещений в брусе:

$$\frac{d\dot{u}(z)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta}\left(c_2 J_{0c}(z) - c_1 J_{1c}(z)\right),$$
$$\frac{d\dot{w}(z)}{\partial z} = -\dot{\vartheta}(z), \tag{11}$$
$$\frac{d\dot{\vartheta}(z)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta}\left(c_0 J_{1c}(z) - c_1 J_{0c}(z)\right).$$

Следуя работе [2], вводим в рассмотрение вектор $V(\tau) = \{\sigma(z,y)\ \ u(z)\ \ w(z)\ \ \vartheta(z)\}$, который полностью определяет напряженно-деформированное состояние конструкции.

Пусть в некоторой точке процесса ползучести, характеризуемой параметром $\tau$, составляющие вектора $V(\tau)$ известны. Тогда могут быть определены физико-механические параметры конструкционного материала, а затем последовательно вычислены параметры $J_{0c}(z)$, $J_{1c}(z)$ по формулам (8), скорости деформаций $\dot{\varepsilon}^0(z)$, $\dot{\chi}(z)$ в узловых сечениях по формулам (10) и скорости напряжений $\dot{\sigma}(z,y)$ по формуле (5). Далее, выполнив решение краевой задачи (11) при заданных граничных условиях, можно найти скорости перемещений $\dot{u}(z)$, $\dot{w}(z)$, $\dot{\vartheta}(z)$. Таким образом, производная вектора состояния $dV/d\tau$ при заданной программе температурного воздействия является функцией параметра $\tau$ и вектора $V(\tau)$:

$$\frac{dV}{d\tau} = f(\tau, V). \tag{12}$$

Зависимость (12) можно рассматривать как математическую модель кинетики процесса вязкоупругого деформирования исследуемой конструкции при переменном температурном воздействии. Полагая, что в начальной точке процесса $\tau = 0$ вектор состояния $V_0$ известен, сводим рассматриваемую задачу к решению задачи Коши для уравнения (12) при начальном условии

$$V(\tau_0) = V_0. \tag{13}$$

При построении алгоритма расчета программу работы конструкции разбиваем на ряд этапов $\tau_0 < \tau_1 < \ldots < \tau_k < \tau_{k+1} < \ldots < \tau_n$, величина которых определяется характером изменения температурного воздействия. Модель изделия представляем в виде совокупности узловых поперечных сечений и узловых точек в узловых сечениях (рисунок 2), количество которых зависит от характерных особенностей конструкции и требуемой точности расчета.

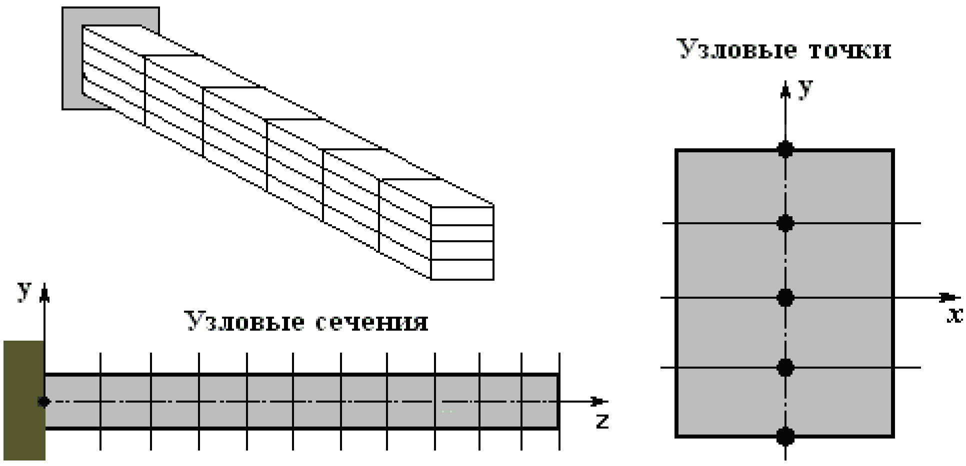


**Рисунок 2. Геометрическая модель бруса**

Численное решение задачи Коши (12)–(13) на этапе ползучести выполняем методом Рунге-Кутта. При вычислении правой части системы (12) сначала вычисляем параметры $J_{0c}(z)$, $J_{1c}(z)$, $\dot{\varepsilon}^0(z)$, $\dot{\chi}(z)$, $\dot{\sigma}(z,y)$. Параметры $c_m$, $d_m$ определяем путем численного интегрирования. Далее выполняем численное решение линейной краевой задачи (11) относительно неизвестных $\dot{u}(z)$, $\dot{w}(z)$, $\dot{\vartheta}(z)$ в узловых сечениях исследуемой конструкции. В процессе решения учитываем изменение параметров состояния конструкционного материала.

Решив задачу Коши (12) – (13), находим значения векторов состояния $V(\tau)$ во всех узловых поперечных сечениях и узловых точках на заданном интервале изменения параметра $\tau$, получая полное описание кинетики процесса неизотермического вязкоупругого деформирования изделия.

Численная реализация разработанного метода компьютерного анализа ползучести рассматриваемых конструкций осуществлена в виде программного обеспечения. Программный комплекс «Creep Rod» имеет модульную структуру, функционирует в операционных системах Windows 2000 / XP / 7, предоставляет пользователю удобный графический интерфейс.

В качестве примера рассмотрим процесс ползучести консольного бруса (рисунок 1). Длина бруса $L$ = 1000 мм, поперечное сечение имеет прямоугольную форму: ширина сечения $b$ =10 мм, высота $h$ = 60 мм. Материал бруса – жаропрочная сталь 45Х25Н20С с пределом текучести $\sigma_{\text{Т}}$ =240 МПа при 20 ºС. Модуль упругости материала бруса: $E(T) = 2 \cdot 10^5 - 100T$. Математическая модель ползучести стали 45Х25Н20С получена на основе экспериментальных данных [3]:

$$V_i^c = A(\sigma_i/\sigma_{\text{Т}})^n \cdot \exp\left(-\frac{B - C \cdot \sigma_i/\sigma_{\text{Т}}}{T + 273}\right).$$

Параметры модели ползучести материала: $A = 6{,}3 \cdot 10^{11}$, $n = 1{,}5$, $B = 4{,}8 \cdot 10^4$, $C = 2{,}9 \cdot 10^4$.

В начальный момент времени ($\tau = 0$) брус нагружали поперечной силой $P_y$ = 120 Н, приложенной к свободному торцу, и нагревали равномерно до температуры $T$ = 960 ºС.

Компьютерный анализ показывает, что в заданных условиях конструкция работает в упругой стадии. Интенсивность напряжений в наиболее опасных точках не превышает 20 МПа. В процессе развития деформаций на этапе неустановившейся ползучести напряжения и деформации в поперечных сечениях бруса непрерывно изменяются во времени. Длительность этапа неустановившейся ползучести не превышает 600 часов, затем распределение напряжений в брусе стабилизируется. На рисунке 3 показано распределение напряжений по высоте поперечного сечения бруса $z = 0$ в начальный момент времени $\tau_0 = 0$ (прямая 1). Кривая 2 показывает распределение напряжений по высоте поперечного сечения в момент времени $\tau$ = 8000 час.

Результаты расчета показывает, что в начальный момент времени $\tau_0 = 0$ прогиб в торцевом сечении бруса ($z$ = 1000 мм) составляет 2,1 мм. В процессе развития деформаций ползучести прогиб увеличивается и через 8000 часов составляет 47,4 мм.

Программный комплекс «Creeping Rod» применяли для компьютерного анализа работы рассматриваемой конструкции при нестационарном температурном воздействии. В начальный момент времени ($\tau = 0$) брус нагружали равномерно распределенной по оси $z$ поперечной нагрузкой 0,25 Н/мм. Величину нагрузки в дальнейшем не изменяли. На первом этапе брус нагревали до температуры 960 ºC и при этой температуре выдерживали 2000 час. На втором этапе температуру нагрева увеличивали до 1000 ºC . Длительность второго этапа также составляла 2000 час. На третьем этапе температуру бруса снижали до 940 °C и при этой температуре выдерживали 2000 час.

Результаты компьютерного анализа показывают, что в начальный момент интенсивность напряжений в брусе не превышает 20,9 МПа. Затем в течение 500 час на первом этапе происходит перераспределение напряжений и деформаций в поперечных сечениях бруса, вследствие чего максимальные напряжения в брусе снижаются до величины 16,3 МПа.

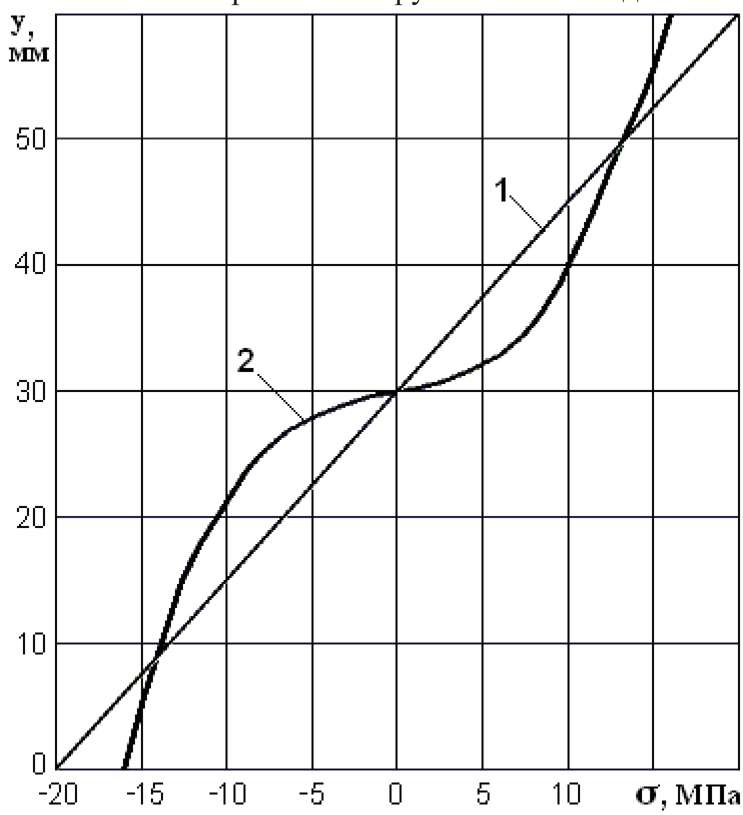


**Рисунок 3. Напряжения в сечении** $z = 0$

На рисунке 4 показаны прогибы свободного торца бруса на всех этапах численного эксперимента. Средняя скорость перемещения торца бруса вследствие ползучести на первом этапе равна 7,5 $\cdot 10^{-3}$ мм/час, перемещение торцевого сечения составляет 17,9 мм. На втором и третьем этапах средняя скорость перемещения торца бруса равна соответственно 1,6 $\cdot 10^{-2}$ мм/час и 2,5 $\cdot 10^{-3}$ мм/час, перемещения торцевого сечения составляют соответственно 49,9 мм и 54,9 мм.

Предложенный метод компьютерного анализа позволяет получить решение ряда новых задач по расчету и исследованию неустановившейся ползучести стержневых элементов конструкций, работающих в условиях нестационарного термомеханического воздействия. В частности, данный метод открывает путь к решению практических задач оптимизации нестационарных режимов эксплуатации оборудования с целью снижения интенсивности процессов вязкоупругого деформирования и накопления повреждений в материале изделий.

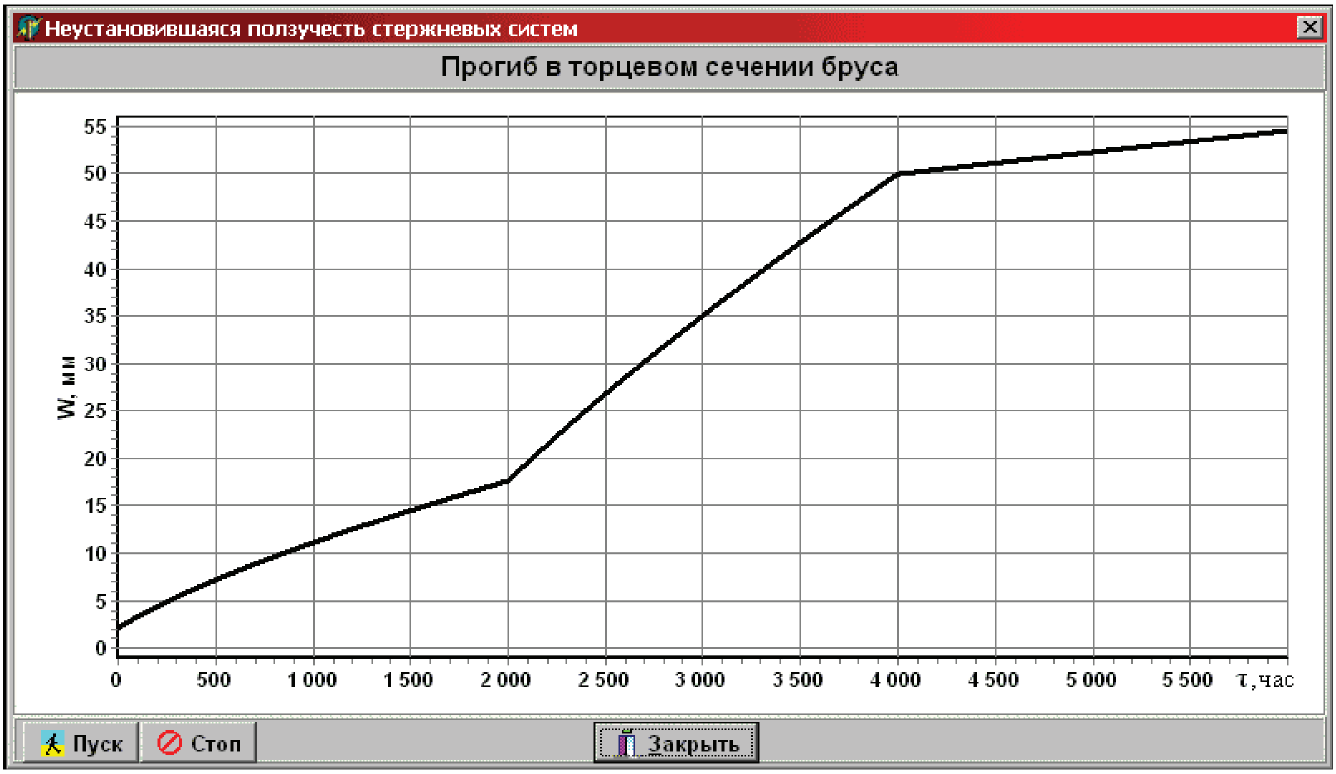


**Рисунок 4. Прогибы бруса при нестационарном температурном воздействии**

**Литература**

1. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
2. Луганцев Л.Д. Анализ циклического упругопластического деформирования и ресурса элементов конструкций // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2014. Т. 80. № 1, с. 54-58.
3. Коростылёв А.В., Луганцев Л.Д. Моделирование процесса ползучести реакционных труб печей конверсии углеводородных газов// Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2009. Т. 75. № 11, с.51-53.

## *Улучшение эксплуатационных характеристик автотранспортной техники за счет применения высокоэффективных присадок*

К.т.н. Зарубин В.П., к.т.н. Киселев В.В., к.т.н. Пучков П.В., к.т.н. Топоров А.В.
*ФГБОУ ВПО Ивановский институт ГПС МЧС России*
*8 (910) 687-53-98, slavakis76@mail.ru*

*Аннотация*. Описана разработанная присадка к маслам и смазкам, содержащая порошок искусственного серпентина. Представлены результаты экспериментальных исследований смазок с порошками серпентина, указаны их триботехнические показатели.

*Ключевые слова:* *пожарная техника, безызносное трение, смазочная композиция*