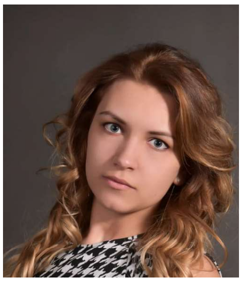
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОНИТОРНГА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ



Остроухова Татьяна Сергеевна
Студентка 4 курса, факультета информационных технологий, кафедры «Инфокогнитивные технологии», Направление подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», Образовательная программа «Интеграция и программирование в САПР» Московского политехнического университета.

Луганцев Леонид Дмитриевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инфокогнитивные технологии», факультет информационных технологий Московского политехнического университета.

Аннотация: *На основе теории нестационарной ползучести излагается метод и алгоритм численного анализа несущей способности и ресурса трубчатых элементов конструкций, оборудования, работающих в условиях нестационарного термосилового воздействия.*

Ключевые слова: *трубчатый элемент, термомеханическое воздействие, ползучесть, несущая способность, остаточный ресурс.*

Abstract: *Based on the theory of unsteady creep, a method and algorithm for the numerical analysis of the bearing capacity and resource of tubular structural elements and equipment operating under conditions of unsteady thermo-force action are described.*

Keywords: *tubular element, thermomechanical action, creep, bearing capacity, residual life.*

Работоспособность и надежность рассматриваемого оборудования во многом определяется ресурсом трубчатых элементов, работающих в условиях высоких температур. Повышенные рабочие температуры вызывают деформации ползучести. Постепенно развивающиеся процессы вязкоупругого течения конструкционного материала могут привести к внезапным отказам (рис. 1). Практическая невозможность мониторинга остаточного ресурса с помощью неразрушающих средств контроля определяет актуальность развития методов компьютерного анализа процессов ползучести материала, основанных на положениях механики вязкоупругой сплошной среды.

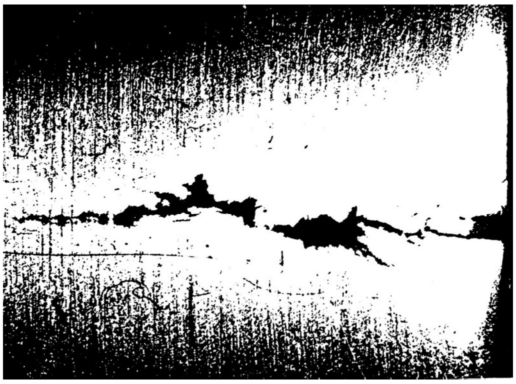


Рис.1. Магистральная трещина в основном металле реакционной трубы из стали типа 45Х25Н20С печи конверсии углеводородов на производстве аммиака, НАК «АЗОТ» г. Новомосковск

Рассматриваем трубчатый элемент, представляющий собой круговую тонкостенную цилиндрическую оболочку. Радиус оболочки – r, толщина стенки – h. Трубчатый элемент нагружен внутренним давлением q, осевым усилием N_s, распределённым по торцу оболочки, и нагрет до температуры T. Температурное поле считаем симметричным и постоянным по длине цилиндра. Силовые нагрузки и температура не изменяются во времени. Однако параметры напряженно-деформированного состояния и геометрические размеры рассматриваемого изделия с течением времени изменяются в силу необратимых деформаций ползучести.

При построении математической модели кинетики процесса ползучести вводим параметр τ, определяющий развитие процесса нагружения изделия. Рассмотрим напряженно-деформированное состояние трубчатого элемента в момент времени τ. Напряжения в оболочке определяются уравнениями безмоментной теории оболочек:

$$\sigma_s = \frac{N_s}{h}, \qquad \sigma_t = \frac{qr}{h}, \qquad \sigma_z = 0. \qquad (1)$$

Скорость изменения напряжений в процессе ползучести

$$\frac{d\sigma_s}{d\tau} = -\sigma_s \frac{d\varepsilon_z}{d\tau},$$
$$\frac{d\sigma_t}{d\tau} = -\sigma_t\left(\frac{d\varepsilon_t}{d\tau} - \frac{d\varepsilon_z}{d\tau}\right),$$
$$\frac{d\sigma_z}{d\tau} = 0. \qquad (2)$$

Уравнения вязкоупругого деформирования конструкционного материала, связывающие скорости изменения напряжений и деформаций, определяются обобщённым законом Гука с учётом деформаций ползучести:

$$\frac{d\varepsilon_s}{d\tau} = \frac{1}{E}\left(\sigma_s\frac{d\sigma_s}{d\tau} - \mu\frac{d\sigma_t}{d\tau}\right) + \frac{d\varepsilon_s^c}{d\tau},$$
$$\frac{d\varepsilon_t}{d\tau} = \frac{1}{E}\left(\sigma_s\frac{d\sigma_t}{d\tau} - \mu\frac{d\sigma_s}{d\tau}\right) + \frac{d\varepsilon_s^c}{d\tau}, \qquad (3)$$
$$\frac{d\varepsilon_z}{d\tau} = -\frac{\mu}{E}\left(\frac{d\sigma_s}{d\tau} + \frac{d\sigma_t}{d\tau}\right) + \frac{d\varepsilon_s^c}{d\tau}.$$

Через промежуток времени $d\tau$ толщина стенки элемента изменится на величину $dh = h\cdot d\varepsilon_z$, а радиус цилиндрической оболочки изменится на величину $dr = r\cdot d\varepsilon_t$. Таким образом,

$$\frac{dh}{d\tau} = h\frac{d\varepsilon_z}{d\tau}, \qquad \frac{dr}{d\tau} = r\frac{d\varepsilon_t}{d\tau}. \qquad (4)$$

Рассматривая совместно уравнения (2) – (4), после алгебраических преобразований получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dh}{d\tau} = h\cdot\frac{3v_i^c}{2\sigma_i}\left[\left(1+\mu\frac{\sigma_s}{E} - \mu\frac{\sigma_t}{E}\right)s_z - \mu\frac{\sigma_t}{E}s_t\right],$$
$$\frac{dr}{d\tau} = r\cdot\frac{3v_i^c}{2\sigma_i}\left[\left(1+\frac{\sigma_t}{E}\right)s_t - \left(-\mu\frac{\sigma_s}{E} + \frac{\sigma_t}{E}\right)s_z\right], \qquad (5)$$
$$\frac{d\sigma_s}{d\tau} = -\sigma_s\cdot\frac{3v_i^c}{2\sigma_i}\left[\left(1+\mu\frac{\sigma_s}{E} - \mu\frac{\sigma_t}{E}\right)s_z - \mu\frac{\sigma_t}{E}s_t\right]$$
$$\frac{d\sigma_t}{d\tau} = \sigma_t\cdot\frac{3v_i^c}{2\sigma_i}\left[\left(1+(1+\mu)\frac{\sigma_t}{E}\right)s_t - \left(1-(1-\mu)\frac{\sigma_t}{E}\right)s_z\right]$$

Согласно общим положениям теории ползучести [1] при сложных напряженных состояниях компоненты скорости ползучести пропорциональны компонентам девиатора напряжений:

$$\frac{d\varepsilon_s}{d\tau} = \frac{3S_s}{2\sigma_i}v_i^c, \quad \frac{d\varepsilon_t}{d\tau} = \frac{3S_t}{2\sigma_i}v_i^c, \quad \frac{d\varepsilon_z}{d\tau} = \frac{3S_z}{2\sigma_i}v_i^c, \qquad (6)$$

где S_s, S_t, S_z – компоненты девиатора напряжений; σ_i – интенсивность напряжений; $v_i^c = f(\sigma_i,\ T)$ – интенсивность скорости деформаций ползучести.

Уравнения (5) и (6) образуют замкнутую систему дифференциальных уравнений относительно параметров состояния трубчатого элемента h, r, σ_s, σ_t, ε_s^c, ε_t^c, ε_z^c с начальными условиями:

$$h(0) = h_0;\ r(0) = r_0;\ \sigma_s(0) = \frac{N_s}{h_0};$$
$$\sigma_t(0) = \frac{qr_0}{h_0},\ \varepsilon_s^c(0) = 0,\ \varepsilon_t^c(0) = 0,$$
$$\varepsilon_z^c(0) = 0 \qquad (7)$$

Систему уравнений (5), (6) с начальными условиями (9) можно рассматривать как математическую модель кинетики процесса вязкоупругого деформирования исследуемой конструкции при комбинированном силовом и температурном воздействии.

Алгоритм расчета сводится к решению задачи Коши для системы дифференциальных уравнений (5), (6) с начальными условиями (7). В результате численного анализа находим значения параметров состояния трубчатого элемента во всех узловых точках процесса нагружения на заданном интервале изменения временного параметра τ, получая в результате полное описание кинетики вязкоупругого деформирования изделия.

Предельное состояние конструкции определяем по величине интенсивности накопленной деформации ползучести ε_i^c. В качестве предельно допустимой величины интенсивности деформаций ползучести принимаем величину $\varepsilon_{i\ \text{кр}}^c$ = 0,03 – 0,05. При таких значениях деформаций существенно возрастает вероятность возникновения трещин в конструкционном материале.

Располагаемый ресурс изделия характеризуется временным интервалом $\left[0,\ \tau_{kp}\right]$, где τ_{kp} – момент времени, когда исследуемая конструкция достигает предельного состояния, и выполняется условие $\varepsilon_i^c = \varepsilon_{i\ \text{kp}}^c$.

Для определения ресурса изделия τ_{kp} используем сочетание шагового метода [2] с последующим уточнением по методу хорд. При этом на каждом шаге выполняем решение задачи Коши (5) – (7), затем вычисляем интенсивность накопленной деформации ползучести:

$$\varepsilon_i^c = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\left(\varepsilon_s^c - \varepsilon_t^c\right)^2 + \left(\varepsilon_t^c - \varepsilon_z^c\right)^2 + \left(\varepsilon_z^c - \varepsilon_s^c\right)^2}$$

и проверяем условие $\varepsilon_i^c = \varepsilon_{i\ \text{kp}}^c$.

Предложенный метод реализован в виде программного обеспечения. Программный комплекс «CreepingTube» имеет модульную структуру, функционирует в операционных системах Windows 7/10. Позволяет выполнять численный анализ несущей способности и располагаемого ресурса высокотемпературных трубчатых элементов, прогнозировать их долговечность в условиях нестационарного силового и температурного воздействия.

Программный продукт «CreepingTube» применяли для расчета реакционных труб печи конверсии метана на производстве аммиака. Диаметр труб D = 115 мм, толщина стенки h = 10 мм. Давление парогазовой смеси в трубах q = 3,6 МПа, температура T_0 = 930 °С. Конструкционный материал – сталь 45Х25Н20С. Параметры математической модели ползучести для стали: С = 1,3·10^{11} 1/ч; n = 4,1; ΔH = 2,9 10^{5} Дж/моль; предел текучести при 20 °С $\sigma_{\grave{o}}$ = 240 МПа.

Относительное увеличение диаметра трубчатого элемента в течение времени показано на рис.2. Интенсивность деформации изображена на графике 1, осевые, кольцевые и радиальные деформации изображены на графиках 2, 3, 4 соответственно.

На рис.3 показано относительное изменение диаметра $\frac{\Delta D}{D_0}$ трубчатого элемента в процессе развития деформаций ползучести.

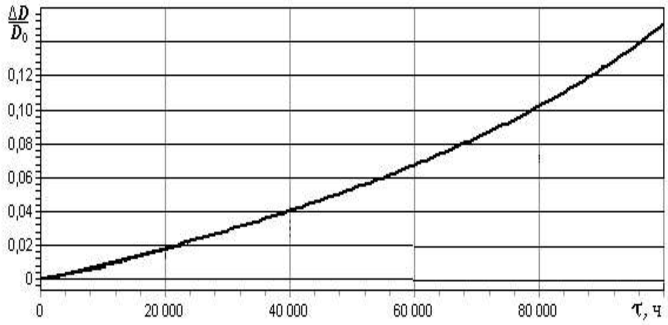


Рис.3. Деформации ползучести трубчатого элемента

Толщина стенки трубы в процессе ползучести уменьшается: $\frac{\Delta h}{h_0} = -\frac{\Delta D}{D_0}$. Принимая предельно допустимое значение $\frac{\Delta D}{D_0}$ = 0,05, находим ресурс изделия τ_{kp} = 50 000 ч. Скорость деформаций ползучести в конце срока службы изделия увеличивается в 1,5 раза по сравнению с первоначальной скоростью.

На рис. 4 изображен график величины повреждений трубчатого элемента.

На рис. 5 представлены графики напряжения в трубатом элементе. Интенсивность напряжений изображена на графике 2, кольцевые и радиальные напряжения изображены на графиках 1 и 3 соответственно.

Таким образом, предложенный метод численного анализа процессов ползучести трубчатых элементов

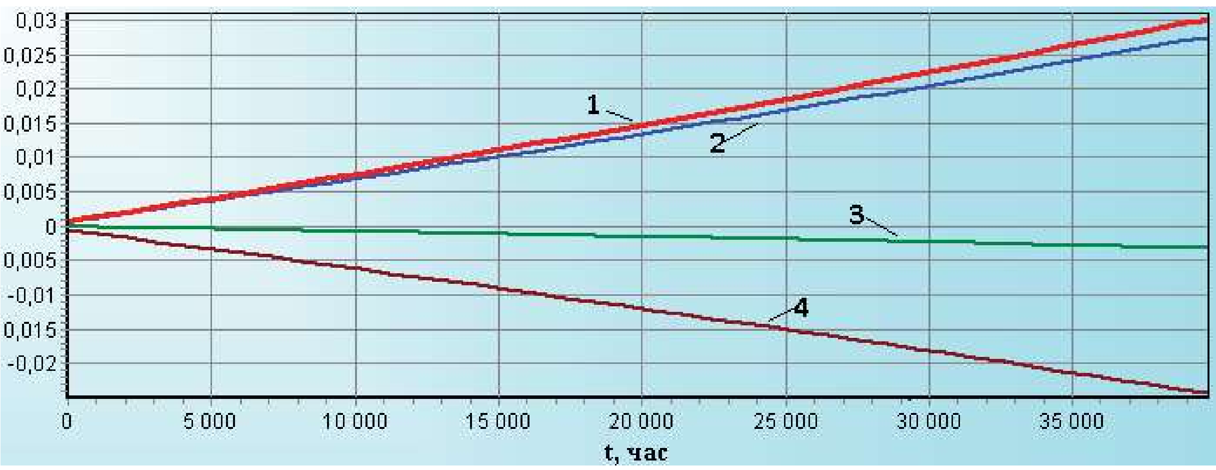


Рис.2. Деформации ползучести трубчатого элемента

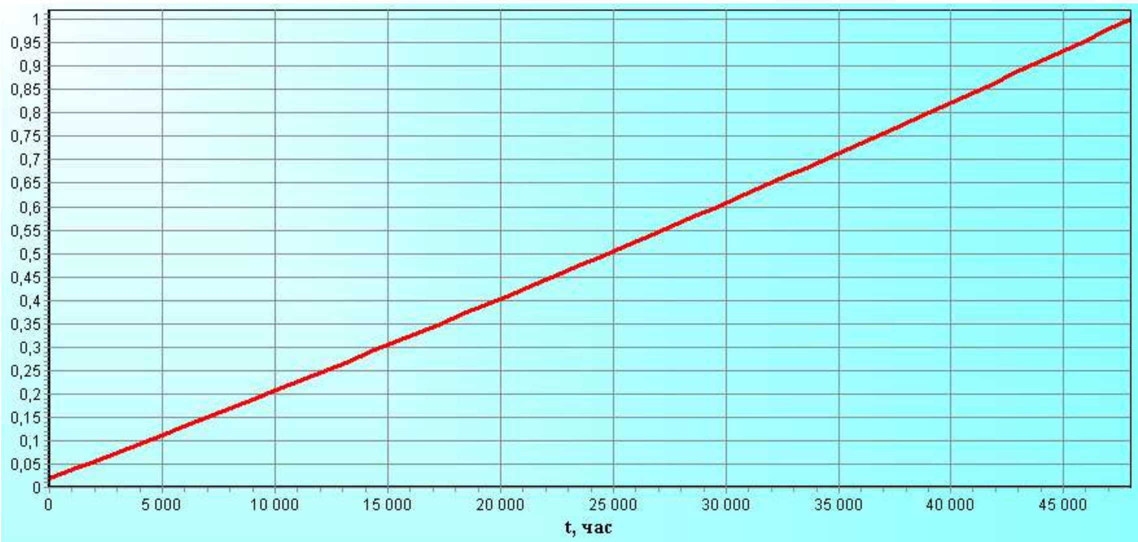


Рис.4. Величина повреждений трубчатого элемента

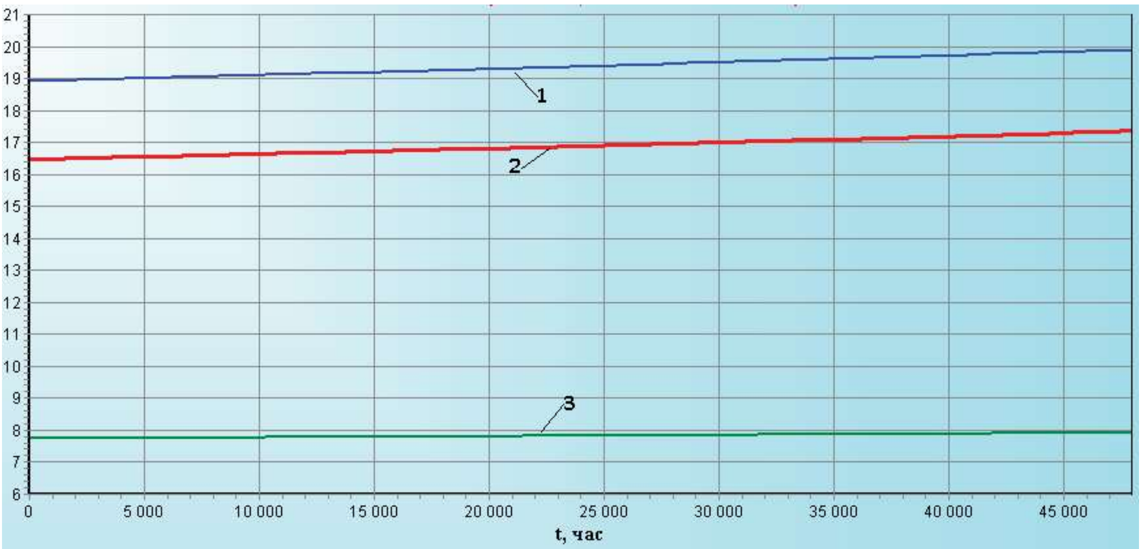


Рис.5. Напряжения в трубчатом элементе

позволяет прогнозировать долговечность изделий, выполнять компьютерный мониторинг несущей способности и располагаемого ресурса высокотемпературного оборудования в условиях нестационарного силового и температурного воздействия.

Список литературы:

1. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести // М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
2. Коростылёв А.В., Луганцев Л.Д. Моделирование процесса ползучести реакционных труб печей конверсии углеводородных газов. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2009, т. 75. № 11, с.52-54.
3. Биргер И.А. Термопрочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. - 455 с.