

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Остроухова Т.С.

*Московский политехнический университет,
Москва, Россия
caesystems@mail.ru*

Аннотация. На основе теории нестационарной ползучести разработаны метод и алгоритм компьютерного анализа располагаемого ресурса трубчатых элементов конструкций, работающих в условиях комбинированного силового и температурного воздействия. Предложенный метод реализован в виде программного обеспечения.

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

Работоспособность и надежность высокотемпературного 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. Практическая невозможность исследования остаточного ресурса с помощью неразрушающих средств контроля определяет актуальность развития методов компьютерного анализа.

Рассматривается задача о кинетике процесса ползучести трубчатого элемента, представляющего собой круговую тонкостенную цилиндрическую оболочку. Ранее была построена математическая модель кинетики [1] процесса вязкоупругого деформирования исследуемой конструкции, которая представляет систему дифференциальных уравнений относительно параметров состояния трубчатого элемента $h, r, \sigma_s, \sigma_t, \varepsilon_s^c, \varepsilon_t^c, \varepsilon_z^c$ с начальными условиями:

$$\begin{aligned} h(0) = h_0; \quad r(0) = r_0; \quad \sigma_s(0) = \frac{N_s}{h_0}; \quad \sigma_t(0) = \frac{qr_0}{h_0}; \\ \varepsilon_s^c(0) = 0; \quad \varepsilon_t^c(0) = 0; \quad \varepsilon_z^c(0) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Для численного анализа вязкоупругого деформирования изделия используем математическую модель скорости ползучести для сложного напряженного состояния [2]

$$v_i^c = C(\sigma_i / \sigma_T)^n \cdot e^{-\frac{\Delta H}{RT}}, \quad (2)$$

где C , n – характеристики конструкционного материала (параметры математической модели), σ_i – интенсивность напряжений; σ_T – предел текучести конструкционного материала; ΔH – энергия активации ползучести; R – универсальная газовая постоянная; T – температура изделия.

Алгоритм расчета сводится к решению задачи Коши для системы дифференциальных уравнений с начальными условиями (1). 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.

Располагаемый ресурс изделия характеризуется временным интервалом $[0, \tau_{кр}]$, где $\tau_{кр}$ – момент времени, когда исследуемая конструкция достигает предельного состояния.

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

Разработка программного продукта осуществлена в системе программирования Embarcadero Rad Studio Community, на языке C++. Интерфейс программы разработан с помощью встроенных в систему компонентов. Результаты численного анализа по желанию пользователя

выводятся в табличной и графических формах, с использованием широкого спектра вспомогательных программных средств среды RAD Studio. В частности, для построения графиков использовался пакет TeeChart [3]

Ниже приведен фрагмент кода на языке C++. Функция `void __fastcall TFDiagram::mDeformClick` задает фактические значения параметров компонента `Chart` и после используется функция `DrawDeform()` для построения графика деформаций.

```
void __fastcall TFDiagram::mDeformClick(TObject *Sender)
{
    Label1->Text = "Деформации ползучести трубчатого элемента";
    Chart1->Title->Text->Clear(); // удаление предыдущих заголовков
    Chart1->Title->Text->Add("Осевые, кольцевые и радиальные деформации,
интенсивность деформаций"); // заголовок графика
    Chart1->LeftAxis->Title->Caption = "Деформации ползучести"; //надпись по
левой оси

    Chart1->Series[0]->Title = "EPScs"; // добавление заголовков в легенду
    Chart1->Series[1]->Title = "EPSct";
    Chart1->Series[2]->Title = "EPScz";
    Chart1->Series[3]->Title = "EPSci";

    Chart1->Series[0]->ShowInLegend = true;
    Chart1->Series[1]->ShowInLegend = true;
    Chart1->Series[2]->ShowInLegend = true;
    Chart1->Series[3]->ShowInLegend = true;

    Chart1->Series[0]->SeriesColor = claGreen;      Series1->LinePen->Width = 2;
    Chart1->Series[1]->SeriesColor = claBlue;      Series2->LinePen->Width = 2;
    Chart1->Series[2]->SeriesColor = claMaroon;    Series3->LinePen->Width = 2;
    Chart1->Series[3]->SeriesColor = claRed;      Series4->LinePen->Width = 3;

    for (int P=0; P < NStep; ++P) {
        YEs[P] = Z[P][6]; //EPScs
        YEt[P] = Z[P][7]; //EPSct
        YEz[P] = Z[P][8]; //EPScz
        YEi[P] = Z[P][9]; //EPSci
    }
    DrawDeform(); // функция отрисовки графика деформаций
}
```

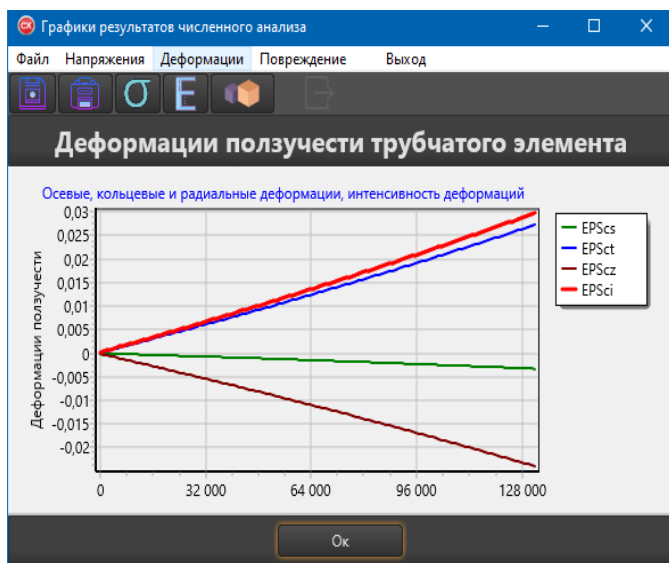


Рис.1. Вкладка графиков деформации трубчатого элемента

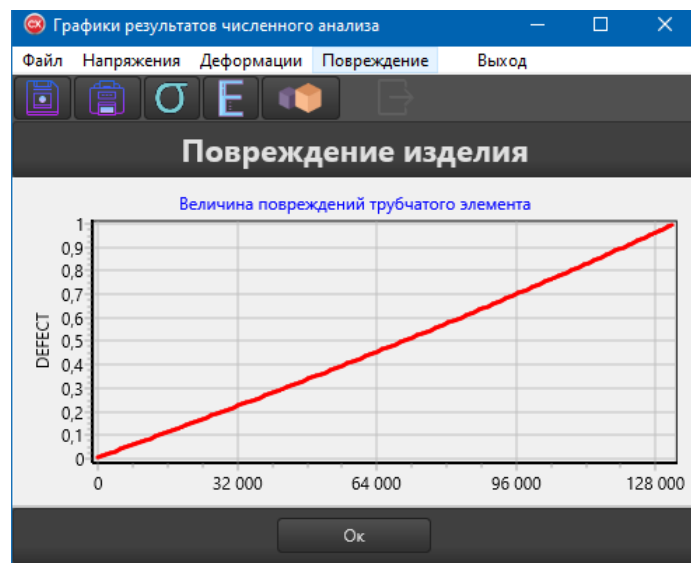


Рис.2. Вкладка графиков повреждений трубчатого элемента

На рис. 1 и 2 представлены результаты компьютерного анализа процесса ползучести реакционных труб печи. На рис. 2 представлен результат компьютерного анализа процесса накопления повреждений в трубчатом элементе. Располагаемый ресурс изделия в данном случае составляет 132 тысяч часов.

Предложенный метод компьютерного анализа процесса ползучести позволяет прогнозировать долговечность тонкостенных элементов конструкций при высоких температурах, осуществлять мониторинг напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса в реальном масштабе времени. Программный продукт может найти применение в отраслевых системах автоматизированного проектирования. Возможно его автономное использование как на этапе проектирования для расчетной оценки располагаемого ресурса элементов конструкций, так и в процессе эксплуатации для оперативного мониторинга состояния и ресурса оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

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. Боровский А.А. С++ и Borland С++ Builder. Самоучитель. / А.А. Боровский, Б.Б. Второй. – Санкт-Петербург: Питер, 2009. – 350. с.

SOFTWARE OF COMPUTER ANALYSIS OF THE RESOURCE OF HIGH-TEMPERATURE EQUIPMENT

Ostroukhova Tatiana

*Moscow Polytechnic University
Moscow, Russian Federation
caesystems@mail.ru*

Abstract. Based on the theory of unsteady creep, a method and algorithm for computer analysis of the residual life of tubular structural elements working under conditions of combined power and temperature effects have been developed. The proposed method is implemented as software.

Keywords: tubular element, creep, thermomechanical effect, bearing capacity, disposable resource.