щественно (более чем в 3 раза) превышает интенсивность напряжений в узле 8. Причина такого состояния заключается в повышенной кольцевой жесткости второго элемента узла 2 (кольцевой пластинки), что приводит к существенному повышению напряжений изгиба в оболочечных элементах этого узла. Это обстоятельство позволяет поставить вопрос о необходимости структурной оптимизации узла 2, заключающейся в замене кольцевой пластинки элементом конической оболочки.

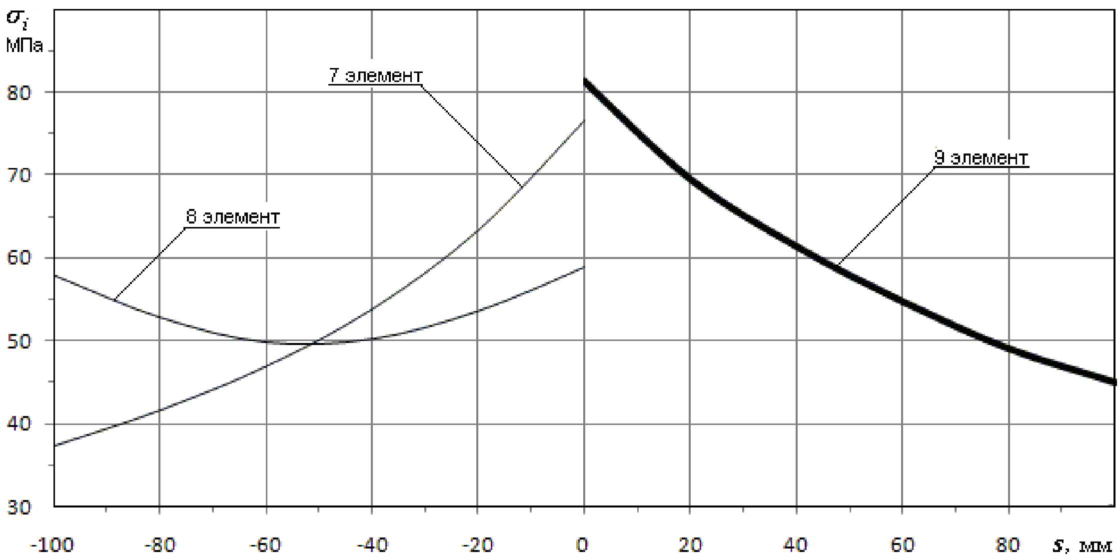

Рисунок 7. Интенсивность напряжений в оболочечных элементах 7, 8, 9

Литература

1. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1977. 488 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. 544 с.

Упругопластический расчет трубчатых элементов конструкций

д.т.н. проф. Луганцев Л.Д., Кощеев Е.С.
Университет машиностроения
8(499)257-16-33

Аннотация. Изложены метод и алгоритм компьютерного анализа напряженно-деформированного состояния трубчатых элементов конструкций в упругопластической стадии работы. Представлены сведения о программной реализации предложенного метода расчета. Приведен пример расчета трубчатых элементов теплообменного аппарата.

Ключевые слова: *трубчатый элемент, напряженно-деформированное состояние, упругопластический расчет, компьютерный анализ.*

Трубчатые элементы широко применяются в химическом и нефтегазовом оборудовании: кожухотрубчатые теплообменные аппараты (рисунок 1), реакционные трубы печей и т.д. Повышенные термомеханические воздействия, связанные с форсированными режимами эксплуатации, вызывают в ряде случаев упругопластическое деформирование элементов конструкций. В таких условиях традиционные методы расчетов на прочность оказываются недостаточными. Для обоснованной оценки несущей способности конструкций необходимы методы, предусматривающие детальное исследование работы изделий за пределами упругих деформаций. Эффективные решения задач в такой постановке могут быть построены на основе деформационной теории пластичности и эффективного применения современных компьютерных технологий.

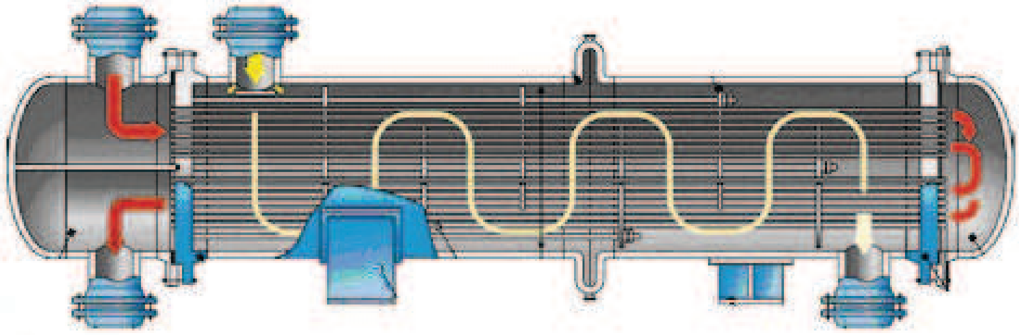

Рисунок 1. Кожухотрубчатый теплообменный аппарат

Трубчатый элемент рассматриваем как цилиндрическую оболочку постоянной толщины, известным образом закрепленную по торцам. Материал оболочечного элемента изотропный, упругий. Задана диаграмма деформирования конструкционного материала $\sigma_i = \sigma_i\left(\varepsilon_i\right)$.

На оболочку действуют распределенная по срединной поверхности нагрузка q_n, нормальная к срединной поверхности, а также распределенная по срединной поверхности оболочки нагрузка q_τ, направленная по касательной к образующей. Кроме того, элемент может быть нагрет до температуры $T = T_0 + ky$ (здесь $\boldsymbol{y}$ – расстояние от срединной поверхности элемента). Температура срединной поверхности элемента изменяется вдоль меридиана по заданному закону $T_0 = T_0(z)$. По толщине стенки температура изменяется по линейному закону с заданным градиентом $k = k(z) = \Delta T(z)/h$, где $\Delta T(z)$ – перепад температуры по толщине стенки.

Решение задачи выполняем на основе деформационной теории пластичности [1]. В качестве координатной поверхности $z = 0$ выбираем срединную поверхность цилиндрической оболочки. Задачу решаем в условиях справедливости гипотез Кирхгофа-Лява.

Напряженно-деформированное состояние упругопластической цилиндрической оболочки описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
&\frac{dx_1}{dz} = -rq_z\,,\\
&\frac{dx_2}{dz} = \bar{N}_2 - rq_n + N_{2\text{T}}\,,\\
&\frac{dx_3}{ds} = Qr\,,\\
&\frac{dx_4}{dz} = \bar{\varepsilon}_1^0 + \varepsilon_{1\text{T}}^0\,,\\
&\frac{dx_5}{dz} = -x_6\,,\\
&\frac{dx_6}{dz} = \bar{\chi}_1^0 + \chi_{1\text{T}}^0\,.
\end{aligned} \tag{1}$$

В этих уравнениях: $x_1 = N_1 r$, $x_2 = Qr$, $x_3 = M_1 r$, x_4 – осевое перемещение, x_5 – радиальное перемещение, x_6 – угол поворота нормали, N_1 – осевое усилие, Q – поперечное усилие, M_1 – меридиональный изгибающий момент,

$$\bar{N}_2 = c_{12}^{(0)}\bar{\varepsilon}_1^0 + c_{11}^{(0)}\varepsilon_2^0 + c_{12}^{(1)}\bar{\chi}_1^0, \qquad N_{2\text{Т}} = c_{12}^{(0)}\varepsilon_{1\text{Т}}^0 + c_{12}^{(1)}\chi_{1\text{Т}}^0 - d_{11}^{(0)};$$

$$\bar{\varepsilon}_1^0 = \frac{1}{c_{11}^{(0)}}\left[N_1 - c_{12}^{(0)}\varepsilon_2^0 - c_{11}^{(1)}\bar{\chi}_1^0\right], \qquad \varepsilon_{1\text{Т}}^0 = \frac{1}{c_{11}^{(0)}}\left[d_{11}^{(0)} - c_{11}^{(1)}\chi_{1\text{Т}}^0\right];$$

$$\bar{\chi}_1^0 = \frac{1}{\Delta}\left[c_{11}^{(0)}\left(\frac{x_3}{r} - c_{12}^{(1)}\varepsilon_2^0\right) - c_{11}^{(1)}\left(N_1 - c_{12}^{(0)}\varepsilon_2^0\right)\right], \qquad \chi_{1\text{Т}}^0 = \frac{1}{\Delta}\left[d_{11}^{(1)}c_{11}^{(0)} - d_{11}^{(0)}c_{11}^{(1)}\right];$$

$$\Delta = c_{11}^{(0)}c_{11}^{(2)} - \left(c_{11}^{(1)}\right)^2.$$

Жесткостные параметры оболочки:

$$c_{11}^{(m)} = \int_{-h/2}^{h/2}\frac{E_C(y)\,y^m}{1-\mu^2}dy \qquad (m = 0,\ 1,\ 2),$$

$$c_{12}^{(m)} = \int_{-h/2}^{h/2}\frac{\mu E_C(y)\,y^m}{1-\mu^2}dy \qquad (m = 0,\ 1,\ 2), \tag{2}$$

$$d_{11}^{(m)} = \int_{-h/2}^{h/2}\frac{E_C(y)\alpha T(y,z)}{1-\mu}y^m dy \qquad (m = 0,\ 1).$$

Для решения задачи применяем метод переменных параметров упругости [2]. Решение краевой задачи для системы дифференциальных уравнений (1) выполняем методом ортогональной прогонки. В процессе вычисления правых частей системы (1) жесткостные параметры оболочки находим по формулам (2) путем численного интегрирования. На нулевом приближении (***k*** = 0) при вычислении жесткостных параметров секущий модуль пластичности принимаем равным $E_C = \dfrac{3E}{2(1+\mu)}$. На следующих приближениях (***k*** > 0) правые части системы (1) вычисляем по следующему алгоритму. В узловых точках по толщине оболочки в поперечном сечении z находим компоненты деформаций:

$$\varepsilon_1(y) = \varepsilon_1^0 + y\chi_1^0, \quad \varepsilon_2(y) = \varepsilon_2^0,$$

где ε_1^0, ε_2^0 – компоненты деформации, χ_1^0 – изменение кривизны координатной поверхности, вычисленные на предыдущем, (***k*** –1)-ом приближении:

$$\varepsilon_1^0 = \bar{\varepsilon}_1^0 + \varepsilon_{1\text{Т}}^0, \quad \chi_1^0 = \bar{\chi}_1^0 + \chi_{1\text{Т}}^0.$$

Для вычисленных значений деформаций $\varepsilon_1(y)$, $\varepsilon_2(y)$ методом последовательных приближений с использованием диаграммы деформирования конструкционного материала находим секущий модуль пластичности для рассматриваемого поперечного сечения z оболочки:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}, \quad \beta^{(p)}(y) = \frac{1 - 2E_C^{(p)}(y)/9K}{1 + 4E_C^{(p)}(y)/9K},$$

$$\varepsilon_3^{(p)}(y) = -\beta^{(p)}(y)\left(\varepsilon_1(y) + \varepsilon_2(y)\right), \tag{3}$$

$$\varepsilon_i^{(p)}(y) = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\left(\varepsilon_1(y) - \varepsilon_2(y)\right)^2 + \left(\varepsilon_2(y) - \varepsilon_3^{(p)}(y)\right)^2 + \left(\varepsilon_3^{(p)}(y) - \varepsilon_1(y)\right)^2}.$$

$\sigma_i^{(p)}(y)=\sigma_i\left(\varepsilon_i^p(y)\right)$ – по диаграмме деформирования материала,

$$E_C^{(p)}(y)=\frac{\sigma_i^{(p)}(y)}{\varepsilon_i^{(p)}(y)}.$$

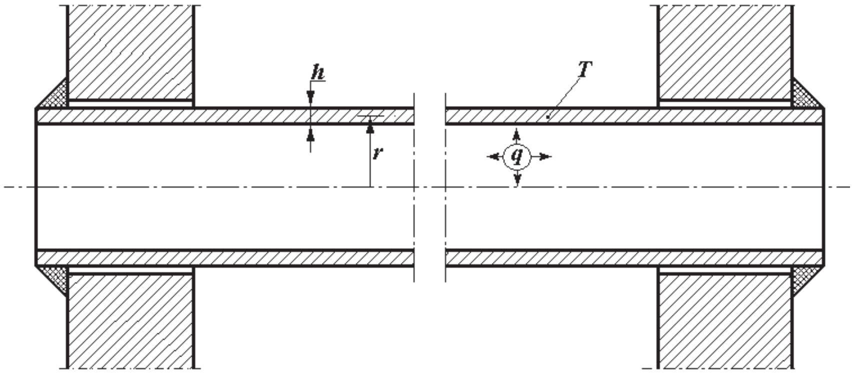

Рисунок 2. Трубчатый элемент теплообменного аппарата

В качестве нулевого приближения $(\boldsymbol{p}=0)$ при реализации итерационного процесса (3) выбираем $E_C^{(0)}(y)=\dfrac{3E}{2(1+\mu)}$. В результате находим в узловых точках оболочки с заданной точностью секущий модуль пластичности $E_C(y)$. Далее по формулам (2) находим жесткостные параметры оболочки, после чего вычисляем правые части системы (1).

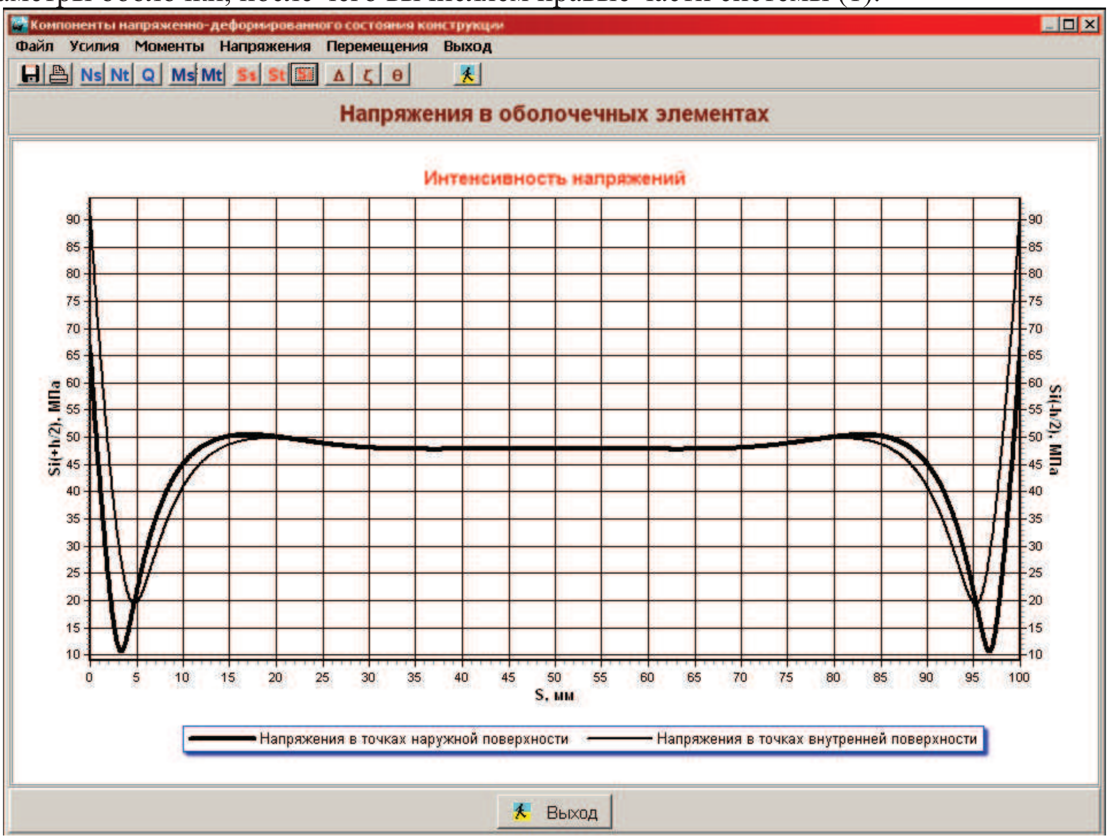

Рисунок 2. Интенсивность напряжений в трубчатом элементе в пусковом режиме (q = 4 МПа, T = 0)

При решении краевой задачи методом ортогонализации на $\boldsymbol{k}$-ом приближении необходимо знать значения жесткостных параметров предыдущего приближения. Значения этих параметров в точках ортонормирования сохраняем в процессе решения краевой задачи на ($\boldsymbol{k}$ –1)-м приближении. Для определения значений жесткостных параметров в промежуточных точках участков ортогонализации на $\boldsymbol{k}$-ом приближении применяем интерполяцию по Лагранжу.

Итерационный процесс решения системы дифференциальных уравнений (1) заканчивается, когда максимальное относительное расхождение двух последующих приближений станет меньше заданного значения ε.

Численная реализация изложенного метода и алгоритма упругопластического расчета трубчатых элементов конструкций осуществлена в виде программного обеспечения. Программный комплекс «ShellCylinderPlasticNonLinear» имеет модульную структуру, функционирует в операционных системах Windows XP / 7, предоставляет пользователю удобный, интуитивно понятный графический интерфейс. Позволяет выполнять численный анализ напряженно-деформированного состояния трубчатых элементов, прогнозировать работоспособность конструкций, осуществлять поиск оптимальных проектных решений.

В качестве примера выполним расчет трубчатого элемента теплообменного аппарата (рисунок 2).

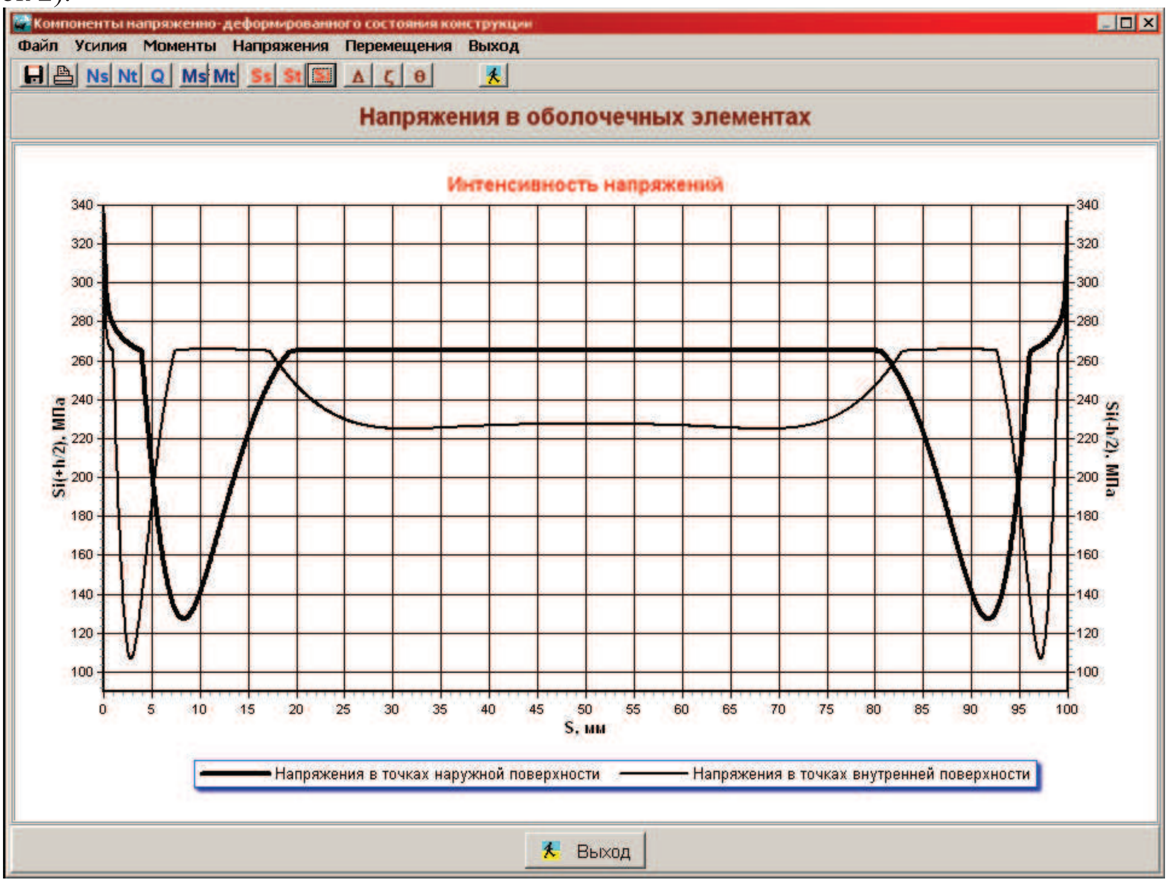

Рисунок 3. Интенсивность напряжений в трубчатом элементе в штатном режиме (q = 4 МПа, $T_{нар}$ =150 ºС, $T_{вн}$ = 100 ºС)

Конструктивные параметры трубчатого элемента: r = 30 мм, h = 2 мм, материал – аустенитная сталь 1Х18Н10Т. Характеристики конструкционного материала: предел текучести $\sigma_{Т}$ = 265 МПа, модуль упругости E = 200000 МПа, касательный модуль пластичности $E_к$ = 5000 МПа. Величина рабочего давления q = 4 МПа.

В период пуска аппарата температурное воздействие на трубчатый элемент отсутствует. Результаты расчета показывают, что трубчатый элемент в пусковом режиме работает в упругой стадии. На рисунке 2 представлены графики интенсивности напряжений в точках внутренней и наружной поверхностей элемента. Максимальная величина интенсивности напряжений достигает значения $\sigma_i^{\max} = 92{,}1$ МПа в точках внутренней поверхности трубчатого элемента.

В штатном режиме температура наружной поверхности трубчатого элемента $T_{\text{нар}}$=150 ºС, температура внутренней поверхности равна $T_{\text{вн}}$ = 100 ºС. На рисунке 3 представлены графики интенсивности напряжений в точках внутренней и наружной поверхностях элемента при работе аппарата в штатном режиме.

Результаты расчета показывают, что пластические деформации развиваются в узких зонах трубчатого элемента примыкающих к сварным соединениям с элементами конструкции корпуса аппарата. Длина пластических зон на наружной поверхности трубчатого элемента составляет 4 мм, на внутренней поверхности – 1,5 мм. Максимальная величина интенсивности деформаций достигает величины $\varepsilon_i^{\max} = 0{,}0154$ в точках наружной поверхности элемента.

Литература

1. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
2. Термопрочность деталей машин. Под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1975. – 456 с.

Программное обеспечение компьютерного мониторинга несущей способности и ресурса трубчатых элементов конструкций

д.т.н. проф. Луганцев Л.Д., Черненко М.О.
Университет машиностроения
8(499)257-16-33

Аннотация. Дается описание программного комплекса, предназначенного для компьютерного мониторинга несущей способности и ресурса трубчатых элементов конструкций, работающих в условиях малоциклового нагружения.

Ключевые слова: *трубчатый элемент, накопление повреждений, компьютерный мониторинг, ресурс конструкции.*

Аварийные ситуации, связанные с отказами технологического оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств, могут послужить причиной серьезных экологических катастроф. Длительность процессов накопления повреждений в конструкционном материале определяется условиями эксплуатации, а поврежденность материала не может быть выявлена традиционными методами неразрушающего контроля. Постепенно развивающиеся процессы накопления повреждений могут привести к внезапным отказам. В таких условиях эффективный компьютерный мониторинг должен предусматривать непрерывное наблюдение за состоянием технологического оборудования. Практическая невозможность исследования остаточного ресурса с помощью неразрушающих средств контроля определяет актуальность развития методов компьютерного моделирования процессов накопления повреждений, основанных на положениях механики упругопластической сплошной среды с учетом истории нагружения и изменения механических свойств конструкционного материала.