

Рис. 4 – Движение областей берега трещины с течением времени

Тогда

$$S_{22} = S_{11} - S_{21} = S_{11} - S_{11} \cdot 2^{-m/2},$$

$$t_2 = t_1 + \frac{S_{22}}{B_1 \cdot \sigma_{i2}^m},$$

где σ_{i2} - напряжения в области 2 при длине трещины ($l-l_1$)

Выполняя аналогичные действия для каждой области, найдем время закрытия трещины:

$$t_n = \sum_{k=1}^n \frac{S_{kk}}{B_1 \cdot \sigma_{ik}^m}, \text{ где}$$

$$S_{kk} = S_{ll} + \sum_{p=1}^{k-2} ((-1)^p \cdot S_{pp} (k - (p-1)))^{-m/2} - S_{(k-1)(k-1)} \cdot 2^{-m/2}, k=(3...n), k, n \in N$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов Л.М. Теория ползучести// Физматгиз. – 1960. – С. 20

УДК 539.4:620.2+519.621.64

Ширвель П.И., Кулак Т.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДА АЭС

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Проведена постановка задачи об упруговязкопластическом деформировании длинных полых тел цилиндрической геометрии при квазистатическом нагружении. Разработана механико-математическая модель процесса деформирования. Получены разрешающие выражения для определения напряженно-деформированного состояния трубопровода в перемещениях. Рассмотрена схема и пример расчета для отрезка трубопровода главного циркуляционного контура АЭС.

Как известно, соединение между собой отдельных агрегатов любой атомной электростанции (АЭС) требует большого числа трубопроводов. Поэтому трубопроводы занимают центральное место в проблеме ресурса эксплуатации. Кроме главных, существует большое количество вспомогательных трубопроводов различных диаметров и назначений. Эти элементы являются наиболее многочисленной группой конструкции энергоблока (общая протяженность трубопроводов на АЭС достигает несколько километров). Учитывая то обстоятельство, что по трубопроводам проходит радиоактивная среда, очевидно, что проектированию и расчетам на прочность трубопроводов АЭС должно уделяться большое внимание. От надежности их эксплуатации во многом зависит безотказная и безопасная работа всей

станции в целом. Кстати, замена трубопроводов (или ремонт) связана, как правило, с большими материальными затратами (стоимость их достигает 10% общей стоимости оборудования станции).

Отмечено [1], что существующие методы и нормы, к сожалению, на данный момент либо не дают адекватного решения этих задач, либо расчет по ним достаточно трудоемкий. Рассмотрение особенностей работы элементов АЭС показывает, что решение задачи об определении напряженно-деформированного состояния (НДС) в полном объеме затруднительно даже на современных высокопроизводительных ПЭВМ. Поэтому целью данной работы является построение простого и доступного для инженерно-

расчетного персонала механико-математического аппарата определения НДС. В процессе расчета должно осуществляться пошаговое моделирование деформаций трубопровода, причем приращение деформации ползучести должно определяться согласно интерполированным кривым ползучести, характерным для рассматриваемого случая.

Постараемся в данной статье учесть все вышеотмеченные моменты, однако первоначально сделаем некоторые предположения: считаем, что справедлив принцип аддитивности для деформаций

различного происхождения; законы пластичности и ползучести, установленные на основе простейших испытаний, как правило, одноосных, можно распространить на сложное НДС; считаем пропорциональными девиаторы напряжений и приращений пластических деформаций и деформаций ползучести.

Рассмотрим НДС толстостенного однородного длинного цилиндра (рисунок 1), находящегося в неравномерном температурном поле $T(r)$ под действием внутренней боковой нагрузки $P_a(t)$ и продольного усилия N_z в условиях пластичности и ползучести (модель НДС трубопровода). Условия равновесия (уравнение Навье) для такой модели (после исключения из них касательных напряжений) сводятся к системе из двух уравнений:

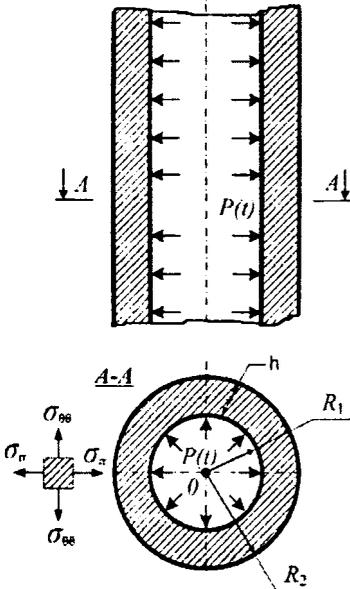


Рис. 1 – Модель НДС сечения трубопровода

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_{rr}}{dr} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0; \\ \frac{d\sigma_{zz}}{dz} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Возникающие при этом в толстостенном цилиндре упругопластические деформации должны также удовлетворять уравнению совместности деформаций:

$$\frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial r} + \frac{\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta}}{r} = 0. \quad (2)$$

Обозначим через ε_{rr} , $\varepsilon_{\theta\theta}$ и ε_{zz} полные деформации в трех главных направлениях. Соотношения между деформациями и перемещениями представим в виде геометрических уравнений (соотношений Коши):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u}{r}; \\ \varepsilon_{zz} &= \text{const} = C_1, \end{aligned} \quad (3)$$

где u компоненты вектора перемещения в радиальном направлении.

Заметим, что трубопроводы АЭС работают в условиях переменных температур, как при нормальной эксплуатации, так и еще в большей мере в процессах остановок и расхолаживания, а также при разогреве и пуске после остановки. В результате изменения температуры среды меняется температура металла, а поэтому и длина трубопроводов. Это в ряде случаев может привести к разрушению труб и аварии на АЭС. Нерегулярный режим работы реактора может также привести к возникновению знакопеременных остаточных деформаций, причем неупругое деформирование связано как с высокими напряжениями (мгновенная пластическая деформация), так и накапливаемыми во времени деформациями ползучести (в основном тепловой). В связи с этим, в соотношениях,

используемых при механическом анализе в случае упругого деформирования, добавим к упругим деформациям члены, описывающие термическое расширение и постоянно накапливаемые деформации, вызванные ползучестью и пластическим течением. Также заметим, что для материалов трубопровода первого контура, несмотря на то, что эти трубопроводы охлаждаются непосредственно сам реактор, не характерна радиационная деформация (радиационное распухание), так как эти элементы не облучаются достаточной плотностью нейтронного потока (менее 10^{17} нейтр/см²·ч).

Таким образом, уравнения для суммарной деформации, используемые при расчетном моделировании НДС, приобретают вид:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \varepsilon_{rr}^e + \varepsilon_{rr}^p + \varepsilon_{rr}^c + [\alpha(T)T - \alpha_0 T_0] \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \varepsilon_{\theta\theta}^e + \varepsilon_{\theta\theta}^p + \varepsilon_{\theta\theta}^c + [\alpha(T)T - \alpha_0 T_0] \\ \varepsilon_{zz} &= \varepsilon_{zz}^e + \varepsilon_{zz}^p + \varepsilon_{zz}^c + [\alpha(T)T - \alpha_0 T_0] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где ε^T – температурное расширение; α , α_0 – текущее и начальное значение коэффициента линейного расширения; T , T_0 – конечное и начальное значение температуры трубопровода; ε_{ij}^p и ε_{ij}^c деформации пластичности и ползучести соответственно; $i, j = r, \theta, z$.

Заметим, что уравнения (4) применимы при соответствующих значениях модуля Юнга E , коэффициента Пуассона ν и характеристик материалов, используемых при описании термического расширения, деформаций пластичности и ползучести. Примем во внимание тот факт, что радиоактивность в трубопроводах, в силу малых значений плотности потока быстрых нейтронов, не приводит к изменению как кратковременных (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент термического расширения, предел текучести) так и длительных (предел ползучести, предел длительной прочности, параметры закона ползучести) механических характеристик материала трубопровода. При этом предполагаем, что модуль Юнга, коэффициент Пуассона и коэффициент теплового расширения не зависят от температуры. Исходя из вышесказанного, принимаем, что

$$\alpha(T) = \alpha_0 = \alpha = const. \quad (5)$$

Зададим неупругие деформации для данной модели НДС. Неупругие объемные деформации в толстостенном цилиндре определим следующим образом:

$$\varepsilon^T = \alpha T(r), \quad (6)$$

где $T(r)$ заданные функции распределения температуры материала трубопровода. Как известно, распределение температурного поля в толстостенном цилиндре задается функцией вида [2]:

$$T(r) = \frac{q_s}{\lambda} \cdot R_B \ln \frac{R_H}{r} + T_H, \quad (7)$$

где R_B и R_H – внутренний и наружный радиусу цилиндра, λ – коэффициент теплопроводности материала трубопровода, q_s – тепловой поток, подводимый с внутренней поверхности трубы, α – коэффициент линейного расширения топливного материала, T_H – температура внешней среды. Заметим, что если известны одновременно температуры наружной и внутренней поверхности трубы, то дополнительно справедливы формулы:

$$T(r) = \frac{T_H - T_B}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \ln \frac{r}{R_B} + T_B, \quad (8)$$

$$T(r) = \frac{T_H - T_B}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \ln \frac{r}{R_H} + T_H, \quad (9)$$

Таким образом, окончательно для данной задачи компоненты тензора деформаций можно представить суммой компонентов упругой деформации, мгновенной пластической деформации, деформации ползучести и температурного расширения:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{1}{E} (\sigma_{rr} - \nu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})) + \varepsilon^T + \varepsilon_{rr}^P + \varepsilon_{rr}^c; \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{E} (\sigma_{\theta\theta} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{zz})) + \varepsilon^T + \varepsilon_{\theta\theta}^P + \varepsilon_{\theta\theta}^c; \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E} (\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta})) + \varepsilon^T + \varepsilon_{zz}^P + \varepsilon_{zz}^c \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Или в тензорном виде деформации для длинного толстостенного цилиндра примут вид:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} [(1 + \nu)\sigma_{ij} - 3\nu\delta_{ij}\sigma] + \delta_{ij}\varepsilon_{ij}^T + \varepsilon_{ij}^P + \varepsilon_{ij}^c, \quad (11)$$

где

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha\Delta T(r) \quad (12)$$

σ – среднее или гидростатическое давление:

$$\sigma = \frac{\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}}{3}. \quad (13)$$

$i, j = r, \theta, z$; δ_{ij} – символ Кронекера:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (14)$$

Кроме того, на боковых поверхностях справедливы условия:

$$\sigma_{rr}(a) = -p_a(t); \quad \sigma_{rr}(b) = 0, \quad (15)$$

А на торцах выполняется равенство

$$\int_a^b \sigma_{zz} r dr = \frac{p_a a^2}{2}; \quad (16)$$

где $R_1 = a$, $R_2 = b$.

Предположим, что

$$\varepsilon_{ij}^P - \delta_{ij}\varepsilon^P = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_u^P}{\sigma_u} (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma), \quad (17)$$

где $\varepsilon_u^P = (\sigma_u, T)$ – функция пластичности материала с учетом нагрева, ε_u^P и σ_u интенсивности пластических деформаций и напряжений соответственно.

$$\varepsilon_u^P = \sqrt{\frac{2}{3} I_{ij}^P I_{ij}^P}; \quad (18)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}. \quad (19)$$

Девяторы деформаций и напряжений соответственно равны:

$$I_{ij}^P = \varepsilon_{ij}^P - \delta_{ij}\varepsilon^P, \quad \varepsilon^P = \frac{1}{3} \varepsilon_{ii}^P; \quad (20)$$

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma, \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ii}. \quad (21)$$

Учитывая условие не сжимаемости материала, имеем

$$\varepsilon_{ii}^P = 0. \quad (22)$$

Тогда выражение (17) примет окончательный вид

$$\varepsilon_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_u^p}{\sigma_u} s_{ij}; \quad (23)$$

где $\varepsilon_u^p = f(\sigma_u, T(r))$ – функция, описывающая пластичность материала (определяется на основе экспериментальных данных) с учетом нагрева. Закон изменения интенсивности скорости пластичности считаем известным [3]:

$$\varepsilon_u^p = A \sigma_u^B, \quad (24)$$

где A и B – параметры пластичности, определяемые экспериментально.

Выберем критерий, по которому будем определять момент наступления необратимого пластического формоизменения. Учитывая, что условие текучести Губера-Мизеса лучше согласуется с опытными данными, чем условие Треска-Сен-Венана, и удобства, с математической точки зрения, ее использования в качестве условия пластичности выбираем именно этот критерий.

$$\sigma_T \geq \sigma_u^{\max}, \quad (25)$$

здесь σ_u^{\max} – наибольшая интенсивность напряжений, полученная в данной точке тела, определяемая по соотношению (19), σ_T – предел текучести материала.

Как было отмечено, конструкционные узлы современных ядерных энергетических установок находятся в напряженном состоянии и при этом работают при повышенных температурах. Поэтому одной из главных причин изменения их размеров является ползучесть. Для определения НДС рассматриваемой модели используем одну из основных теорий, описывающих ползучесть материала – теорию течения [4,5]. Зададим ползучесть в виде, учитывающим радиационную и тепловую составляющие:

$$\dot{\varepsilon}_u^c = K \sigma_u + M \sigma_u^m, \quad (26)$$

где K, M – модуль радиационной и тепловой ползучести соответственно, m – показатель тепловой ползучести ($5 < m < 6$), σ_u – интенсивность напряжений. Обратим внимание на то, что в материалах трубопроводов первого контура, несмотря на то, что эти трубопроводы охлаждаются непосредственно сам реактор, радиационная ползучесть не наблюдается, так как эти трубопроводы не облучаются достаточным потоком нейтронов, поэтому в расчёте радиационную ползучесть не учитываем.

Модуль температурной ползучести материала в выражении (26) подчиняется закону:

$$M = B_0 \exp\left(\frac{-Q}{R_0 T(r)}\right), \quad (27)$$

где B_0, Q – параметры, определяющие тепловую ползучесть материала, R_0 – газовая постоянная. Таким образом, при известном законе изменения интенсивности скорости ползучести $\dot{\varepsilon}_u^c = f(\sigma_u, t, T(r))$, скорости деформации ползучести на каждом временном шаге определим из выражений:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij(n)}^c &= \varepsilon_{ij(n-1)}^c + \Delta_n \varepsilon_{ij}^c; \\ \Delta_n \varepsilon_{ij}^c &= \dot{\varepsilon}_{ij(n-1)}^c \Delta_n t; \\ \dot{\varepsilon}_{ij(n-1)}^c &= \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_u^c(n-1)}{\sigma_u^c(n-1)} s_{ij(n-1)}; \\ \dot{\varepsilon}_u^c &= f(\sigma_u, t, T(r)). \end{aligned} \quad (28)$$

Заметим, что здесь σ_u – интенсивность напряжений, найденная в результате решения упругопластической задачи.

В первом приближении принимаем гипотезу плоской деформации $\varepsilon_{zz} = C_1 = 0$, так как продольный размер реального участка трубопровода достигает 10-12 м, что в несколько десятков раз больше поперечного, и выражаем из (11) все компоненты тензора напряжения. Отметим, что этот процесс

достаточно прост, но в то же время довольно громоздкий и утомителен. Поэтому сразу остановимся на окончательных результатах. Где, принимая во внимание тот факт, что материал при пластических изменениях несжимаем и то, что деформация ползучести происходит при постоянном объеме, следовательно, компоненты ε^p и ε^c связаны условиями несжимаемости [9]. Учитывая соотношения Коши (3) и условия несжимаемости при пластичности и ползучести, компоненты тензора напряжений примут вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{E}{(1+\nu)} \left(\frac{du}{dr} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} - 3\alpha T \right) - (\alpha T + \varepsilon_{rr}^p + \varepsilon_{rr}^c) \right); \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{E}{(1+\nu)} \left(\frac{u}{r} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} - 3\alpha T \right) - (\alpha T + \varepsilon_{\theta\theta}^p + \varepsilon_{\theta\theta}^c) \right); \\ \sigma_{zz} &= \frac{E}{(1+\nu)} \left(\varepsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} - 3\alpha T \right) - (\alpha T + \varepsilon_{zz}^p + \varepsilon_{zz}^c) \right);\end{aligned}\quad (29)$$

Уравнения (29) подставляются в уравнение равновесия (1) и получается следующее дифференциальное уравнение для радиальных перемещений:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d(ru)}{dr} \right] &= \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} \right) \left(\frac{d(\varepsilon_{rr}^c + \varepsilon_{rr}^p)}{dr} + \frac{\varepsilon_{rr}^c - \varepsilon_{\theta\theta}^c + \varepsilon_{rr}^p - \varepsilon_{\theta\theta}^p}{r} \right) + \\ &+ \left(\frac{1+\nu}{1-\nu} \right) \frac{d}{dr} (\alpha T)\end{aligned}\quad (30)$$

Замыкаем данную систему граничными условиями (16) и (17).

Таким образом, определение НДС поставленной задачи сводится к решению системы уравнений равновесия (30) с учетом граничных условий (16) и (17). Для определения НДС с учетом вязкопластических свойств необходимо разрешить задачу деформирования относительно основных характеристик НДС без учета пластичности и ползучести (при нулевом времени). Зная вектор перемещения точек толстостенного цилиндра по указанным выше формулам (3) и (29) легко построить тензоры деформаций и напряжений в любой точке трубы. После чего необходимо проверить выполнение условия пластичности (25). Если условие нарушено, то на данном шаге счета в выражениях опускаются составляющие пластической деформации. А в случае выполнения – учитываются остаточные пластические деформации по соотношениям (23) только в тех точках, где выполняется условие пластичности. Аналогично можно определить значение деформации ползучести для первого промежутка времени dt по выражениям (28) и пересчитать величины тензоров деформаций и напряжений с учетом ползучести материала за любой промежуток времени. Таким образом, находится численное решение задачи с учетом необратимых деформаций. Зная вектор перемещения, можем построить тензоры деформаций и напряжений в любой точке по длине участка трубопровода с последующей оценкой его НДС на основе того или иного критерия.

Численного решения данной задачи можно получить, используя метод конечных разностей (МКР) и метод матричной прогонки, подробно расписанные в работе [6]. С помощью этих методов по выражениям (30), (29), (27) и (3) легко получить решение системы нелинейных уравнений, являющейся для данного случая уравнений с постоянными коэффициентами системой эллиптического типа. Для численного решения краевой задачи (30) необходимо перейти от дифференциального неоднородного уравнения второго порядка к системе нелинейных уравнений, линеаризовать уравнения и получить решение полученной СЛАУ. Таким образом, заменяя производные по радиусу центральными разностями, систему дифференциальных уравнений сводим к разностной системе нелинейных уравнений относительно искомых функций перемещения. В основу метода решения разностной системы уравнений положен метод матричной прогонки [7,8]. Для вычисления коэффициентов прогонки получены рекуррентные соотношения. И так как коэффициент разностной системы, представленной в каноническом виде, меньше по абсолютной величине единицы, следовательно, при вычислении коэффициентов прогонки ошибки округления не возрастают, что позволяет надеяться, что метод решения сходящийся.

В качестве примера расчета рассмотрим НДС отрезка трубопровода главного циркуляционного контура для первой очереди Ново-Воронежской АЭС. В алгоритме предусмотрим учет напряжений в окружном направлении (вследствие действия внутреннего давления), а также остаточных и

температурных напряжений. Считаем, что отрезок трубы, изготовленной из стали типа 12X18H10T с внутренним диаметром 500 мм и толщиной 25мм(500x25) в течение длительного времени (от 1000 до 10000 ч.) находится при постоянной температуре $T=490^{\circ}\text{C}$. Как и ранее, коэффициент линейного расширения материала трубы, пределы текучести и модуль упругости которые в общем случае есть линейные функции температуры, считаем постоянными во время всего процесса нагружения. Упруго пластические свойства материала описываются соотношениями (23). В результате, для определения перемещений и напряжений участка данного трубопровода при сложном нагружении была разработана компьютерная программа, реализующая алгоритм расчета по МКР методом матричной прогонки. Результатом реализации вышеперечисленного алгоритма в пакете MathCad стали значения перемещений (максимальное перемещение соответствовало 0,016мм при $r=17\text{мм}$) и напряжений для данного участка трубопровода. Графическое распределение радиальных и окружных напряжений представлены на рисунке 2. Как видно, для труб реакторов первого контура, которые нагружены внутренним механическим давлением и неравномерным температурным полем эквивалентное напряжение меньше предельно допустимого и условие прочности выполняется.

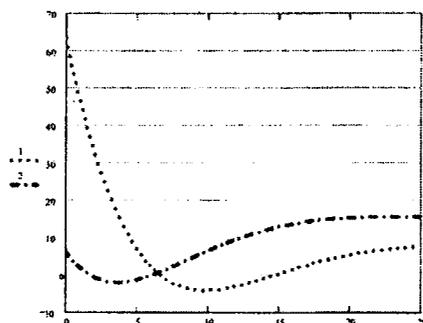


Рис. 2 – Распределение радиальных (1) и окружных (2) напряжений в трубопроводе, МПа

Проведем расчет ползучести данного отрезка трубопровода в течение длительного времени ($t=10\ 000\text{ч}$) при постоянной температуре. В расчете будем использовать интерполированные экспериментальные кривые ползучести, полученные в результате испытания стандартных образцов на ползучесть при различных напряжениях.

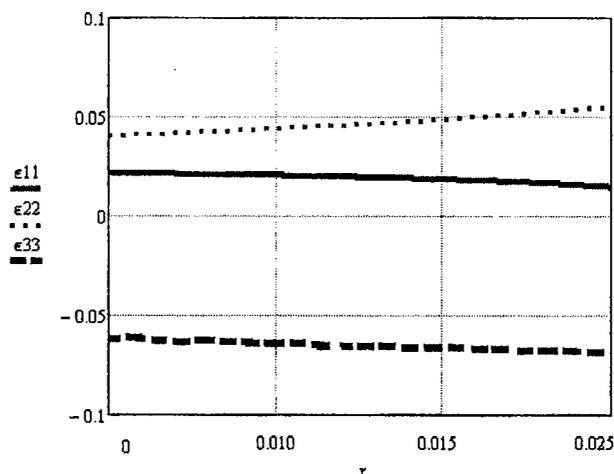


Рис. 3 – Распределение деформации ползучести по сечению трубопровода при $t=10^4\text{ч}$ (ϵ_{11} , ϵ_{22} , ϵ_{33} – соответственно радиальные, окружные и осевые компоненты деформации ползучести)

Результаты расчета представлены в виде кривых ползучести вдоль радиуса трубопровода. Как видно из рисунка 3, значения деформации ползучести со временем могут достигать значительных величин (до 6% при 10^4ч работы), что необходимо учитывать при определении рабочего ресурса и запаса прочности для такого элемента. Так как полученные экспериментальные и расчетные данные показывают значительное влияние деформаций ползучести на прочностные характеристики конструкционных

материалов, что подтверждает ее важность учета в расчетах. Из графика видно, что наибольшее приращение (для данного случая) получает окружающая деформация ползучести, что можно легко объяснить увеличением со временем работы диаметра толстостенного цилиндра (текущего участка трубопровода). Заметим, что результаты расчета сравнены с экспериментальными данными [1] и выявлено их хорошее соответствие.

Таким образом, при длительной эксплуатации трубопроводов АЭС в условиях сложного нагружения при повышенных температурах необходим учет эффекта формоизменения вследствие термического расширения, пластичности и ползучести. Неучет деформационного характера нагружения трубопровода, проявляющегося в релаксации напряжений, и нестационарности нагружения и температурного распределения может привести к неверной оценке реальных величин деформаций. При этом решение задачи должно включать в себя моделирование процесса деформирования трубопровода на каждом шаге нагружения. В этой связи, разработанная механико-математическая модель и алгоритм нахождения основных характеристик НДС для длинного толстостенного цилиндра, являющимся в общем случае моделью участка трубопровода АЭС может быть реальным инструментом для прогнозирования ресурса данных элементов конструкций (пуская и в первом приближении). Так как предложенный в работе подход для определения НДС трубопроводов весьма выгоден в силу простоты реализации, отсутствия дополнительных экспериментальных исследований и удовлетворительной точности получаемых результатов.

Авторы работы выражают глубокую благодарность д.ф.-м.н., профессору И.С. Куликову и д.т.н., профессору Б.Е. Тверковкину за плодотворные обсуждения и дискуссии в Белорусском национальном техническом университете и ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стасенко, И.В. Расчет трубопроводов на ползучесть//М.: Машиностроение, 1986 – 256с.
2. Займовский, А.С. Тепловыделяющие элементы атомного реактора/ А.С. Займовский, В.В. Калашников, Головин И.С – М.: Атомиздат, 1970 – 517с.
3. Куликов, И.С. Прочность элементов конструкций при облучении / И.С. Куликов, В.Б. Нестеренко, Б.Е. Тверковкин. – Минск: Наука и техника, 1990. – 144с.
4. Писаренко, Г.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести / Г.С. Писаренко, Н.С. Можарский – Киев: Наукова думка, 1981. – 496с.
5. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.:Наука. 1979. 744с.
6. Ширвель, П.И. Решение радиационно-термоупругой задачи для сплошного цилиндра / П.И. Ширвель, И.С. Куликов//Республиканский межведомственный сборник научно-технических статей «Теоретическая и прикладная механика». Минск, 2008, Вып.23, С.55-63.
7. Рихтмайер, Р.Д. Разностные методы решения краевых задач / Р.Д. Рихтмайер, К. Мортон. – М.: Мир, 1972. – 418с.
8. Победря, Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 344с.

УДК 629.113.073

Гурвич Ю.А., Сафронов К.И.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ МНОГООСНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В статье описана методика исследования характеристик управляемости и устойчивости многоосных транспортных средств в пакете SolidWorks Motion. Разработана динамическая модель двух-, трех- и четырехосных транспортных средств, с помощью которой посредством виртуальных испытаний определены показатели управляемости и устойчивости движения машины. Приведены результаты виртуальных испытаний. Показано, что виртуальное моделирование позволяет в значительной степени сократить стадию проектирования и объем натурных испытаний машин.