

НДС ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ НАГРЕВЕ И НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Клус С.А., Ширвель П.И., Левчук А.В.

Creep strength of cylindrical shell under irregular temperature and radiation. The numerical solution has been proposed to solve the strength problem for the cylindrical shell under creep, thermal and radiation strains at nuclear power plant action.

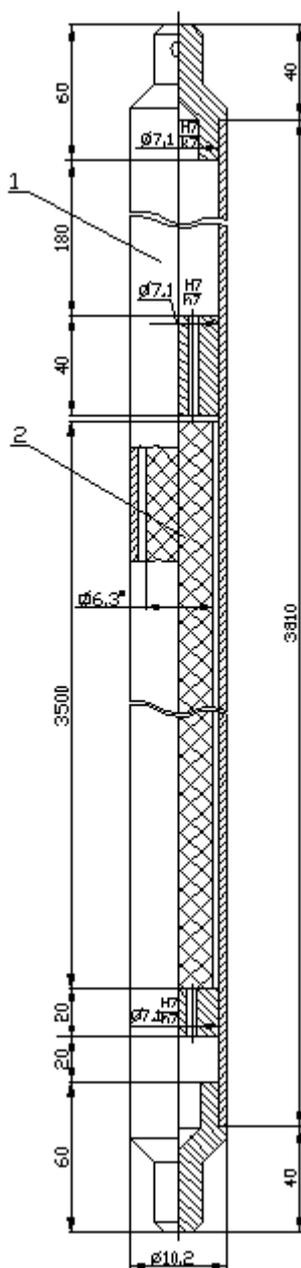


Рис. 1 Твэл: 1- защитная оболочка; 2- топливный сердечник.

Оболочка тепловыделяющего элемента (твэла) ядерного реактора (рис.1) атомной электростанции (АЭС) представляет собой слой конструкционного материала, непосредственно прилегающего к ядерному топливу. Она предназначена для предохранения сердечника от воздействия химически активной среды и удержания продуктов деления, а также для исключения возможности вымывания топлива теплоносителем и для обеспечения механической прочности твэлов. Причем главным требованием, предъявляемые к оболочкам реакторов, является длительное сохранение герметичности. Отметим, что конструкция оболочки и ее толщина должны обеспечивать устойчивость под действием внешнего давления теплоносителя, прочность при термических, изгибных напряжениях, и напряжений от давления газообразных продуктов деления и действия распухающего топливного сердечника, приходящего в контакт с оболочкой, коррозии под напряжением. В соответствии с этим к материалам оболочки предъявляются следующие требования: коррозионная устойчивость в среде теплоносителя при рабочих температурах, радиационная стабильность, совместимость с материалом сердечника, малое поперечное сечение, высокие механические свойства, доступность использования, хорошая теплопроводность, высокая температура плавления.

Отметим, что оболочка твэла является также наиболее ответственной конструкционной деталью активной зоны реактора, находящейся в очень сложных тепловых, механических, радиационных и химических условиях эксплуатации. В то же время, обладая, как правило, стенками относительно малой толщины, оболочки весьма чувствительны к внутренним и наружным дефектам. Требования к материалу оболочки твэла весьма многообразны, но среди них можно выделить четыре главных: минимальный паразитный захват нейтронов; механическая надежность, постоянство формы и размеров оболочки; высокая теплопроводность, обеспечивающая теплопередачу без чрезмерно высоких термических напряжений в оболочке; коррозионная и эрозионная стойкость оболочки в теплоносителе и в контакте с ядерным горючим твэла.

Высокая теплопроводность материала оболочки необходима, прежде всего, для того,

чтобы обеспечивать минимальный возможный перегрев самой оболочки и горючего по сравнению с температурой теплоносителя. С теплопроводностью материала оболочки непосредственно связана величина термических напряжений в оболочке, которые могут достигать 100-250 МПа. При низкой теплопроводности материала расчетная толщина оболочки часто оказывается настолько малой, что необходимая механическая надежность оболочки не обеспечивается. Увеличение же толщины оболочки, ухудшает теплопередачу, приводит к нежелательному увеличению термических напряжений в оболочке, к общему перегреву твэла. Внутренние напряжения при неблагоприятных условиях могут привести к деформации (например, искривлению), растрескиванию горючих и конструкционных материалов, вызвать резкое повышение температуры и разрушение оболочек. Степень изменений, происходящих в оболочках под влиянием перечисленных факторов, зависит от интенсивности и длительности нейтронного облучения, температуры облучения и характера ее изменения в процессе работы реактора, от исходной структуры и свойств материалов оболочек, от свойств теплоносителя и его гидравлических характеристик.

Одним из важных следствий эксплуатации оболочки твэла является возникновение внутренних напряжений, как в материалах активного объема, так и в оболочках (рис. 2). Появление внутренних напряжений связано с действием внешних статических, динамических и вибрационных нагрузок, со структурными изменениями под облучением, с неодинаковым температурным уровнем отдельных участков оболочек вследствие неравномерности энерговыделения по объему, с температурными градиентами по сечению оболочки, возникающими благодаря наличию тепловых потоков от горючего к теплоносителю, а также с различием в величине коэффициентов термического расширения горючего и оболочки, а также в распухании топливного стержня и оболочки [1].

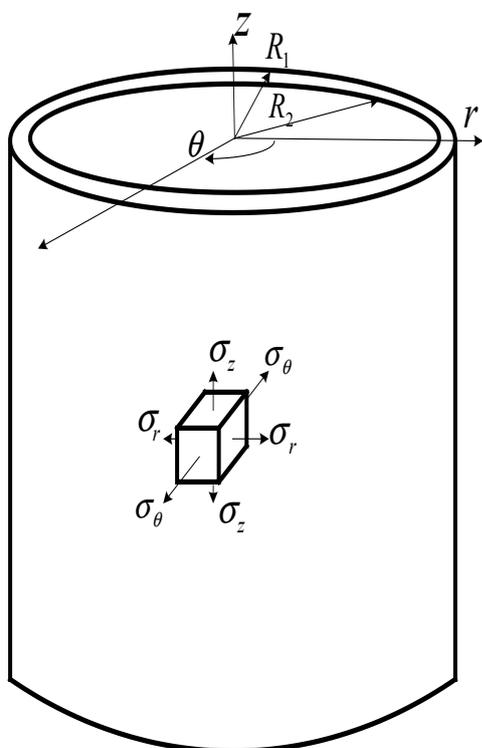


Рис. 2. Распределение напряжений в оболочке твэла

Изучение характера и степени возможных повреждений оболочек составляет одну из самых сложных проблем. Одним из способов решения является исследование НДС с целью проверки надежной работоспособности конструкции. Вопросом расчета активных зон ядерных реакторов в настоящее время уделяется значительное внимание. Данные элементы имеют, как правило, либо цилиндрическую геометрию и подвержены значительным механическим, тепловым и радиационным нагрузкам. Отметим, что степень необратимых изменений, происходящих в оболочках под влиянием перечисленных факторов, зависит от интенсивности и длительности нейтронного облучения, температуры облучения и характера ее изменения в процессе работы реактора, от исходной структуры и свойств материалов оболочек, от свойств теплоносителя и его гидравлических характеристик. К настоящему времени выполнен значительный объем работ по этому направлению (Ю. И. Лихачев, В. Я. Пупко, В. В. Попов, А. А. Тутнов, В. В. Ткачев, И. С. Куликов, Geittus J. H., Lassmann K., Nagato K., Takikawa N., Rashid J. R.). Однако все разработанные модели для определения НДС защитных

оболочек базируется на тех или иных упрощениях, поэтому расчеты носят достаточно приближенный характер. Вообще для тел, находящихся в условиях нестационарного неравномерного нагрева и радиационного облучения и изготовленных из конструкционных материалов с физически нелинейными свойствами (пластичность и ползучесть), в настоящее время нет общепринятой теории напряженно-деформированного состояния при механических нагрузках. Поэтому цель, которая преследуется авторами, заключается в том, чтобы на основе принципов и методов механики деформированного твердого тела представить теорию напряженно-деформированного состояния для тонкостенной цилиндрической оболочки при механических нагрузках с учетом внутриреакторных условий.

В рассматриваемой постановке задачи присутствуют радиационное распухание оболочки. В общем случае оно представляет собой изменение объема оболочки под действием потока быстрых нейтронов. Действие радиационного распухания значительно изменяет картину распределения деформаций и напряжений. А термическое воздействие, в данной задаче, представляет собой неравномерный нагрев тонкостенной цилиндрической оболочки. Помимо этого от воздействия радиации и высоких температур в оболочке так же возникают необратимые деформации ползучести, которые существенно изменяют картину напряженно-деформированного состояния оболочки с течением времени.

Для компонент деформации и изменений кривизны срединной поверхности оболочки, и перемещений ее срединного слоя имеют место следующие приближенные соотношения:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial z}; \quad \varepsilon_{22} = \frac{1}{R} \frac{u_2}{\partial \beta} + \frac{\omega}{R}; \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial u_1}{\partial \beta} + \frac{\partial u_2}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\chi_{11} = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}; \quad \chi_2 = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{\partial \omega}{\partial \beta} - u_2 \right); \quad \chi_{12} = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \omega}{\partial \beta} - u_2 \right) \quad (2)$$

Для цилиндрической оболочки во внутриреакторных условиях, компоненты деформаций и напряжений в общем виде связаны между собой соотношениями:

$$\varepsilon^{(z)}_{11} = \frac{\sigma_{11} - \nu \sigma_{22}}{E} + \varepsilon_{11}^T + \frac{1}{3} \varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{11}^c; \quad (3)$$

$$\varepsilon^{(z)}_{22} = \frac{\sigma_{22} - \nu \sigma_{11}}{E} + \varepsilon_{22}^T + \frac{1}{3} \varepsilon_{22}^S + \varepsilon_{22}^c.$$

$$\sigma_{11} = \frac{N_{11}}{h} + \frac{12M_{11}z}{h^3}; \quad \sigma_{22} = \frac{N_{22}}{h} + \frac{12M_{22}z}{h^3}. \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{11} &= D_N \left(\varepsilon_{11} + \nu \varepsilon_{22} - (1 + \nu)(\varepsilon_{11}^T + \varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{11}^c) \right); \\ N_{22} &= D_N \left(\nu \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} - (1 + \nu)(\varepsilon_{22}^T + \varepsilon_{22}^S + \varepsilon_{22}^c) \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{11} &= D_M \left(\chi_{11} + \nu \chi_{22} - (1 + \nu)(\chi_{11}^T + \chi_{11}^S + \chi_{11}^c) \right); \\ M_{22} &= D_M \left(\nu \chi_{11} + \chi_{22} - (1 + \nu)(\chi_{22}^T + \chi_{22}^S + \chi_{22}^c) \right) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Рассмотрим оболочку твэла под воздействием поля высоких температур и нейтронного потока, приводящих к появлению тепловой и радиационной ползучести. В качестве конкретного примера будем рассматривать напряженно-деформированное состояние оболочки твэла, изготовленной из стали ОХ16Н15МЗБ (316L – зарубежный аналог). Оболочка внутренним радиусом $R_1 = 0,003$ м и внешним радиусом $R_2 = 0,0033$ м находится под действием: внутренних $P_B = 7,5$ МПа и внешних $P_H = 0,1$

МПа нагрузок в условиях объемных термических $T(r)$ и радиационных $S(T(r), \phi t)$ деформаций со следующими данными: $E = 2,10^5$ МПа, $T(R_1) = 300(573)^\circ\text{C}(K)$, $T(R_2) = 600(873)^\circ\text{C}(K)$, $\alpha = 18,3 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. $S(T(r), \phi t)$ – функция радиационного распухания, зависящая от температуры, времени и заданного нейтронного потока:

$$S(T(r), \phi t) = 4,9 \cdot 10^{-51} (\phi t)^{1,71} \cdot 10^{\frac{15490}{T(r)} + \frac{5,98 \cdot 10^6}{(T(r))^2}} \quad (7)$$

Основная задача работы состоит в получении системы разрешаемых уравнений математической модели механических процессов в оболочке при наличии объёмных изменений и физических нелинейных эффектов. При рассмотрении задачи НДС оболочки сделаем некоторые допущения:

- перемещения и деформации оболочки малы (значительно меньше единицы);
- радиальная, тангенциальная и продольные оси оболочки (Z, θ, X) являются главными;
- температура оболочки считается заданной – $T(Z, \theta, X)$.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние тонкостенной цилиндрической оболочки (рис. 3), находящейся под действием физических нагрузок, поля высоких температур и нейтронного облучения с учетом тепловой и радиационной ползучести. Из симметрии можно заключить, что сдвигающие силы $N_{x\phi} = N_{\phi x}$ обращаются в данном случае в нуль. Точно также, следуя из симметрии, обнаруживается, что поперечные силы Q_ϕ обращаются в нуль. Также на основании симметрии крутящие моменты $M_{x\phi} = M_{\phi x}$ обращаются в нуль.

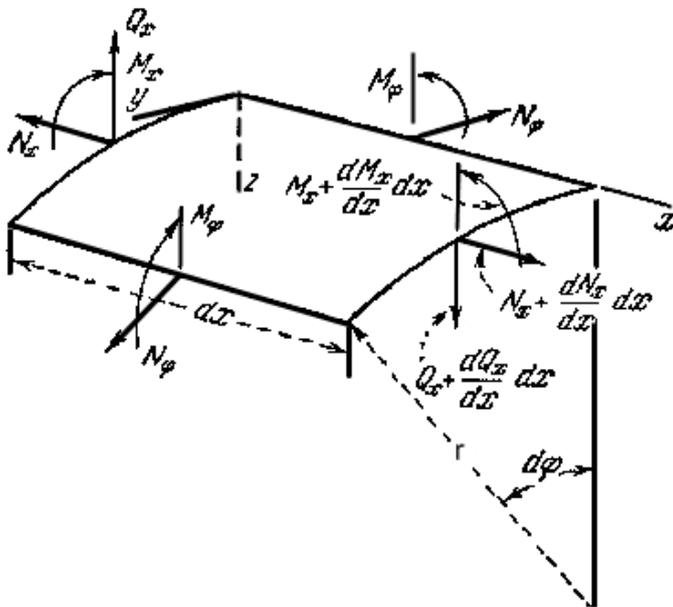


Рис. 3. Проекция сил и моментов сил в тонкостенной цилиндрической оболочке для вывода уравнения равновесия

Спроектируем силы на оси x и z и найдём моменты сил относительно оси y . Положим, что внешние силы действуют только лишь по нормали к поверхности оболочки.

С учетом вышесказанного система уравнений равновесия принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dN_x}{dx} \cdot r \cdot dx \cdot d\phi = 0, \\ \frac{dQ_x}{dx} \cdot r \cdot dx \cdot d\phi + N_\phi \cdot dx \cdot d\phi + q \cdot r \cdot dx \cdot d\phi = 0, \\ \frac{dM_x}{dx} \cdot r \cdot dx \cdot d\phi - Q_x \cdot r \cdot dx \cdot d\phi = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Откуда получаем исходное уравнение равновесия, записанное через приложенные нагрузки и образуемые моменты:

$$\begin{cases} \frac{dN_x}{dx} = 0, \\ \frac{dQ_x}{dx} + \frac{N_\varphi}{r} + q = 0, \\ \frac{dM_x}{dx} - Q_x = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Из первого уравнения системы (9) следует, что $N_x = const = 0$. Влиянием сил N_x пренебрегаем. Тогда уравнение равновесия представится в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dQ_x}{dx} + \frac{N_\varphi}{r} = -q, \\ \frac{dM_x}{dx} - Q_x = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Продифференцируем второе уравнение системы уравнений (10) по x , получим следующее соотношение:

$$\frac{d^2M_x}{dx^2} = \frac{dQ_x}{dx} \quad (11)$$

Подставим уравнение (11) в первое уравнение системы (10), получим соотношение:

$$\frac{d^2M_x}{dx^2} + \frac{N_\varphi}{r} = -q \quad (12)$$

Запишем величины в (12) через индексы. Получим следующее выражение:

$$\frac{d^2M_{11}}{dx^2} + \frac{N_{22}}{r} = -q \quad (13)$$

Запишем геометрические уравнения (соотношения Коши). Из симметрии следует, что v – смещение в окружном направлении обращается в нуль, поэтому принимаем во внимание только u и w для связи тензора деформаций и вектора перемещений в (1):

$$\varepsilon_{11} = \frac{du}{dx}; \quad \varepsilon_{22} = \frac{w}{r}; \quad \chi_{11} = -\frac{d^2w}{dx^2}. \quad (14)$$

Выведем физические уравнения. Учитывая, что нормальные напряжения на площадках, параллельных срединной поверхности оболочки пренебрежимо малы по сравнению с остальными напряжениями и при расчёте не учитываются, запишем систему физических уравнений (3) в виде:

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11} - \nu\sigma_{22}}{E} + B(r) + \varepsilon_{11}^c; \\ \varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22} - \nu\sigma_{11}}{E} + B(r) + \varepsilon_{22}^c; \end{cases} \quad (15)$$

Где функция $B(r)$:

$$B(r) = \alpha \cdot T(r) + \frac{1}{3} \cdot S[T(r), \phi t] \quad (16)$$

Отметим, что одновременно с неравномерным нагревом и воздействием нейтронных потоков элементы активных зон ядерных реакторов испытывают такие процессы, как тепловая и радиационная ползучесть. Ввиду одновременного действия температуры и облучения происходят неравномерные объемные изменения материала конструкции (термическое расширение и радиационное распухание). Эти неравномерные объемные изменения являются источником дополнительных напряжений,

которые наряду с напряжениями, вызванными механическим воздействием, оказывают влияние на поведение конструкции. Вопрос состоит в том, насколько сильно они могут повлиять на прочностные качества исследуемых тел. Важно также знать, при каких распределениях температуры это влияние существенно. Для определения распухания материала использовалась зависимость [2]:

$$S(T(r,Z), \phi t) = 4.9 \cdot 10^{-51} (\phi \cdot t)^{1.71} \cdot 10^{\frac{15490 + 5.98 \cdot 10^6}{T(r) + (T(r))^2}} \quad (17)$$

Где $S(T(r, Z), \phi t)$ – функция радиационного распухания, зависящая от температуры, времени, заданного нейтронного потока; ϕ – нейтронный поток; ε_{ij}^c – деформации ползучести.

Закон ползучести материала оболочки с учетом облучения задаем соотношением [3]:

$$\dot{\varepsilon}^c = [dce^{-ct} + B(T)] \sigma^{m(T)} + K_0 \exp(A_1 - A_2 T) \phi \sigma, \quad (18)$$

где d, c, m, K_0, A_1, A_2 – параметры температуры, зависящие от температуры и облучения.

Выразим из системы уравнений (15) σ_{11} и σ_{22} :

$$\begin{cases} \sigma_{11} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{11(z)} + \nu \cdot \varepsilon_{22(z)} - B(r) \cdot (1+\nu) - \varepsilon_{11}^c - \nu \cdot \varepsilon_{22}^c] \\ \sigma_{22} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{22(z)} + \nu \cdot \varepsilon_{11(z)} - B(r) \cdot (1+\nu) - \varepsilon_{22}^c - \nu \cdot \varepsilon_{11}^c] \end{cases} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{11(z)} = \varepsilon_{11} + z \cdot \chi_{11}; \quad \varepsilon_{22(z)} = \varepsilon_{22} + z \cdot \chi_{22}. \quad (20)$$

Выражения (11) устанавливают связь между деформациями в произвольной точке оболочки и перемещениями соответствующей точки срединной поверхности.

Воспользуемся формулами для определения нормальных сил и изгибающего момента

$$N_{11} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{11} dz; \quad N_{22} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{22} dz; \quad M_{11} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{11} \cdot z \cdot dz. \quad (21)$$

Применим формулы (21) к системе (19), учитывая (20) и проведя интегрирование, получим новую систему физических уравнений:

$$\begin{cases} N_{11} = \frac{E \cdot h}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{11} + \nu \cdot \varepsilon_{22} - B(r) \cdot (1+\nu) - \varepsilon_{11}^c - \nu \cdot \varepsilon_{22}^c] \\ N_{22} = \frac{E \cdot h}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{22} + \nu \cdot \varepsilon_{11} - B(r) \cdot (1+\nu) - \varepsilon_{22}^c - \nu \cdot \varepsilon_{11}^c] \\ M_{11} = D \cdot [\chi_{11} + \nu \cdot \chi_{22}] \end{cases} \quad (22)$$

где $D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жёсткость оболочки

Подставим в систему уравнений (22) соотношения Коши (14) и учитывая, что при рассмотрении системы уравнений равновесия было принято $N_{11} = 0$, будем иметь:

$$\frac{E \cdot h}{1 - \nu^2} \cdot \left[\frac{du}{dx} + \nu \cdot \frac{w}{r} - B(r) \cdot (1 + \nu) - \varepsilon_{11}^c - \nu \cdot \varepsilon_{22}^c \right] = 0, \quad (23)$$

$$\frac{du}{dx} = -\nu \cdot \frac{w}{r} - B(r) \cdot (1 + \nu) - \varepsilon_{11}^c - \nu \cdot \varepsilon_{22}^c.$$

Подставляем (23) во второе уравнение системы (19) и получаем N_{22} . В итоге получена следующая система уравнений записанная через усилия:

$$\begin{cases} N_{22} = E \cdot h \cdot \left[\frac{w}{r} - B(r) - \varepsilon_{22}^c \right], \\ M_{11} = -D \cdot \frac{d^2 w}{dx^2}. \end{cases} \quad (24)$$

Подставляя уравнения (24) в (13), находим:

$$D \cdot \frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{E \cdot h}{r^2} \cdot w = q - \frac{E \cdot h}{r} \cdot [B(r) + \varepsilon_{22}^c] \quad (25)$$

Таким образом, в результате исследования для рассматриваемой цилиндрической оболочки было выведено следующее уравнение равновесия (16). Где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$, E – модуль Юнга; r – радиус оболочки; h – толщина оболочки; w – прогиб; α – коэффициент линейного расширения материала.

Представленные выше уравнения равновесий для цилиндрических оболочек, выражены через их прогиб. С учетом вышеизложенного, получим основное дифференциальное уравнение относительно функции перемещений деформированной цилиндрической оболочки в условиях нейтронного облучения, термического нагрева и ползучести материала. Основные обозначения для тензора деформаций в задаче следующие: ε_{ij}^T – объемные термические деформации; ε_{ij}^S – объемные деформации радиационного распухания; ε_{ij}^c – механические деформации ползучести.

Для рассматриваемой модели определения НДС используем одну из основных теорий, описывающих ползучесть материала – теорию течения [4-5]. Деформации ползучести определяются на каждом временном этапе (процесс деформирования разбивается на малые интервалы по времени) следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11n}^c &= \varepsilon_{11n-1}^c + \dot{\varepsilon}_{11n-1}^c \Delta_n t; \\ \varepsilon_{22n}^c &= \varepsilon_{22n-1}^c + \dot{\varepsilon}_{22n-1}^c \Delta_n t; \\ \dot{\varepsilon}_{11n-1}^c &= \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_{un-1}^c}{\sigma_{un-1}^c} (\sigma_{11n-1}^c - \frac{1}{3} \sigma_{n-1}^c); \\ \dot{\varepsilon}_{22n-1}^c &= \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_{un-1}^c}{\sigma_{un-1}^c} (\sigma_{22n-1}^c - \frac{1}{3} \sigma_{n-1}^c). \end{aligned} \quad (26)$$

Где $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22})$, n – номер интервала по времени, $\dot{\varepsilon}_u, \sigma_u^c$ – интенсивности скоростей деформаций ползучести и напряжений соответственно, связанные законом ползучести для материала оболочки:

$$\dot{\varepsilon}_u^c = f(\sigma_u^c, T, \phi, t). \quad (27)$$

Полученное уравнение (16) представляет собой дифференциальное уравнение изогнутой срединной поверхности цилиндрической оболочки, позволяющее после

определения прогиба определить деформации и напряжения. Отметим, что большинство физических процессов в активной зоне АЭС описывается именно нелинейными уравнениями. Аналитическое решение подобных уравнений известно лишь для единичных случаев. Поэтому решение нелинейных задач сводится к использованию численных методов. Главное преимущество этих методов заключается в том, что они позволяют получить решение задачи в любом случае (и тогда, когда неизвестно аналитическое решение). Выражения (27, 26) позволяют вести расчет НДС с учетом тепловой и радиационной ползучести. Дальнейшие исследования в этом направлении дадут возможность проводить численные расчеты тонких цилиндрических оболочек, находящихся в условиях ядерных реакторов, что в свою очередь позволит проводить оценку прочностных характеристик элементов активных зон ядерных реакторов без проведения дорогостоящих экспериментов.

Благодарности

Авторы благодарят д.ф.-м.н. И.С.Куликова и д.т.н. Б.Е.Тверковкина за плодотворные обсуждения и дискуссии в ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси.

Работа выполняется по гранту государственной программы научных исследований на 2009г. Финансирует: Министерство образования Республики Беларусь (номер госрегистрации: №2009487). Тема: «Напряженно-деформированное состояние тонкостенных цилиндрических и призматических оболочек в условиях ядерных реакторов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов. Москва. Энергоатомиздат.1986,-247с.
2. Куликов И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С.Куликов, Б.Е. Тверковкин.- Минск: Наука и техника,1984. – 104с.
3. Куликов И.С., Прочность элементов конструкций при облучении /И.С. Куликов, Нестеренко, Б.Е. Тверковкин.- Минск: Наука и техника, 1990.– 144с.
4. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. 1979. 744с.
5. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. -М. Машиностроение, 1975. - 400 с.