

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Работа любого ядерного реактора атомной электростанции (АЭС) связана с постоянным мониторингом (контролем) безопасности, которая основана на безопасной работе его отдельных элементов, одним из которых является тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ), имеющий, как правило, форму длинного цилиндра и находящийся в сложных условиях: постоянное механическое воздействие, влияние неравномерных полей высоких температур и радиационного облучения. Под работоспособностью ТВЭЛ АЭС понимается: сохранение целостности защитной оболочки на стадии облучения в тепловыделяющей сборке (ТВС) активной зоны и отсутствии ее значительных формоизменений, которые могут помешать нормальной эксплуатации ядерного реактора.

Оболочка тепловыделяющего элемента ядерного реактора 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, предъявляемым 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 и изгибных напряжениях, напряжений от давления газообразных продуктов деления и действия распухающего топливного сердечника, приходящего в контакт с оболочкой.

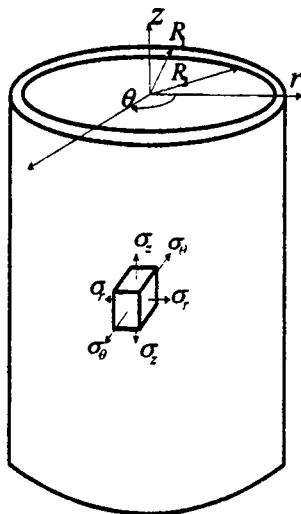


Рис. 1. Распределение главных напряжений в оболочке ТВЭЛ

Одним из важных следствий эксплуатации оболочки ТВЭЛ является возникновение внутренних напряжений (рис. 1). Появление внутренних напряжений связано с действием внешних статических, динамических и вибрационных нагрузок, со структурными изменениями под облучением, с распуханием топливного стержня и оболочки [1], с неодинаковым темпера-

турным уровнем отдельных участков оболочки, с температурными градиентами по сечению оболочки, а также с различием в величине коэффициентов термического расширения горючего и оболочки. Очевидно, что 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. Важно также знать, при каких флюенсах нейтронов распределения температуры это влияние существенно.

Отметим, что защитная оболочка твэла является 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 [2]. Высокая теплопроводность материала оболочки необходима, прежде всего, для того, чтобы обеспечивать минимально 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. Внутренние напряжения при неблагоприятных условиях могут привести к деформации (например, искривлению), растрескиванию 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.

Таким образом, в оболочках твэлов и процессе работы ядерного реактора могут возникать три типа напряжений [3]:

- вызываемые давлением теплоносителя и давлением газов в зазоре, а также давлением распухающего топлива, находящегося в контакте с оболочкой;
- обусловленные стационарными и нестационарными температурными полями;
- от неравномерного распухания материала оболочки.

В настоящее время изучение характера и степени возможных повреждений оболочек составляет одну из самых сложных проблем. Данные элементы имеют, как правило, 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. Пулко, В. В. Попов, А. А. Тутнов, В. В. Ткачев, И. С. Куликов, Geittus J. H., Lassmann K., Nagato K., Takikawa N., Rashid J. R. И др. Однако все разработанные модели для определения НДС защитных оболочек базируются на тех или иных допущениях, и носят достаточно приближенный характер. Поэтому цель, преследуемая авторами, заключается в том, чтобы на основе принципов и методов механики деформированного твердого тела представить теорию напряжённо-деформированного состояния для тонкостенной цилиндрической оболочки при механических нагрузках с учётом внутрореакторных условий АЭС. В рассматриваемой постановке задачи присутствуют радиационное распухание оболочки. В общем случае оно представляет собой изменение объема оболочки под действием потока быстрых нейтронов, причем значительно меняет картину распределения деформаций и напряжений. Термическое воздействие, в данной задаче, представляет собой неравномерный стационарный нагрев тонкостенной цилиндрической оболочки.

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

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

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

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

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

Рассмотрим оболочку твэла под воздействием поля высоких температур и нейтронного потока. В качестве конкретного примера будем рассматривать напряженно-деформированное состояние оболочки твэла, изготовленной из стали ОХ16Н15М3Б (316L – зарубежный аналог).

Таким образом, имеем, что оболочка внутренним радиусом $R_1 = 0,003$ м и внешним радиусом $R_2 = 0,0033$ м находится под действием: внутренних $P_A = 7.5$ МПа и внешних $P_1 = 0.1$ МПа нагрузок в условиях объемных термических $T(r)$ и радиационных $S(T(r), \phi)$ деформаций со следующими параметрами $E = 2.10^5$ 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 $^{-1}$.

Где $S(T(r), \phi)$ – функция радиационного распухания, зависящая от температуры, времени и заданной плотности нейтронного потока, имеет вид [4]:

$$S(T(r), \phi t) = 4.9 \cdot 10^{-51} (\phi t)^{1.71} \cdot 10^{\frac{15490}{T(r)} + \frac{5.98 \cdot 10^6}{(T(r))^2}} \quad (7)$$

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 НДС тонкостенной цилиндрической оболочки (рис. 2), находящейся под действием физических нагрузок, поля высоких температур и нейтронного облучения.

Из симметрии можно заключить, что сдвигающие силы $N_{x\varphi} = N_{\varphi x}$ 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 $M_{x\varphi} = M_{\varphi x}$ обращаются в нуль. 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.

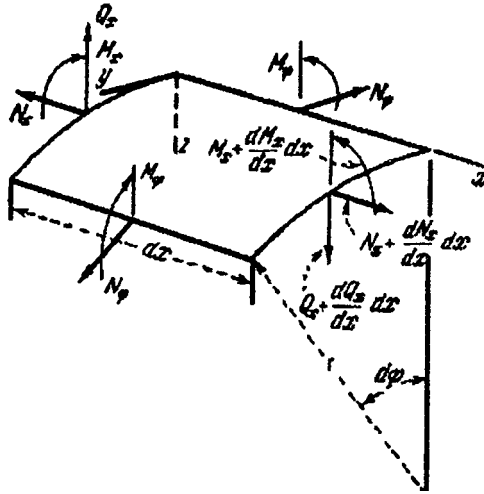


Рис. 2. Проекция сил и моментов сил в тонкостенной цилиндрической оболочке для вывода уравнения равновесия

С учетом вышесказанного, система уравнений равновесия принимает следующий вид:

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

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

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

Подставим уравнение (11) в первое уравнение системы (10)

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

Запишем величины в (12) через индексы

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

Запишем геометрические уравнения (соотношения Коши). Из симметрии следует, что v – смещение в окружном направлении обращается в ноль, поэтому в расчетах учитываются только u и w для связи тензора деформаций и вектора перемещений.

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

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:

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

где функция $B(r)$:

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

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

$$\begin{cases} \sigma_{11} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{11(z)} + \nu \cdot \varepsilon_{22(z)} - B(r) \cdot (1+\nu)]; \\ \sigma_{22} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{22(z)} + \nu \cdot \varepsilon_{11(z)} - B(r) \cdot (1+\nu)]; \end{cases} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{11(z)} = \varepsilon_{11} + z \cdot \chi_{11}; \quad \varepsilon_{22(z)} = \varepsilon_{22} + z \cdot \chi_{22}. \quad (18)$$

Выражения (17) устанавливают связь между деформациями в произвольной точке оболочки и перемещениями соответствующей точки срединной поверхности.

Воспользуемся формулами для определения нормальных сил и изгибающего момента

$$N_{11} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{11} dz; \quad N_{22} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{22} dz; \quad M_{11} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{11} \cdot z \cdot dz. \quad (19)$$

Применим формулы (19) к системе (17), учитывая (18) и проведя интегрирование, получим новую систему физических уравнений:

$$\begin{cases} N_{11} = \frac{E \cdot h}{1 - \nu^2} \cdot [\varepsilon_{11} + \nu \cdot \varepsilon_{22} - B(r) \cdot (1 + \nu)] \\ N_{22} = \frac{E \cdot h}{1 - \nu^2} \cdot [\varepsilon_{22} + \nu \cdot \varepsilon_{11} - B(r) \cdot (1 + \nu)] \\ M_{11} = D \cdot [\chi_{11} + \nu \cdot \chi_{22}] \end{cases} \quad (20)$$

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

Подставим в систему уравнений (20) соотношения Коши (14) и, учитывая, что при рассмотрении системы уравнений равновесия было принято $N_{11} = 0$, будем иметь:

$$\frac{du}{dx} = -\nu \cdot \frac{w}{r} + B(r) \cdot (1 + \nu). \quad (21)$$

Подставляя (21) во второе уравнение системы (17) получаем N_{22} . В итоге – получена следующая система уравнений, записанная через усилия:

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

Подставляя уравнения (22) в (13), находим:

$$D \cdot \frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{E \cdot h}{r^2} \cdot w = q - \frac{E \cdot h}{r} \cdot [B(r) + \varepsilon_{22}^c] \quad (23)$$

Таким образом, получили уравнение равновесия для цилиндрической оболочки в условиях нейтронного облучения и термического нагрева, выраженное через ее прогиб. Основные обозначения для тензора деформаций следующие: ε_{ij}^T – объёмные термические деформации; ε_{ij}^S – объёмные деформации радиационного распухания. Отметим, что большинство физических процессов в активной зоне АЭС описывается нелинейными уравнениями. Аналитическое решение подобных уравнений известно лишь для единичных случаев. Поэтому решение таких задач сводится к использованию численных методов. Наиболее простым в употреблении и достаточно точным численным методом решения дифференциальных уравнений является метод Рунге-Кутты. Для решения дифференциального уравнения методом Рунге-Кутты, задаем гра-

нические условия: один торец оболочки жёстко закреплён, второй без опоры. Эти граничные условия представляются в следующей математической интерпретации:

$$\begin{aligned} \omega &= 0 \text{ при } x = 0; \\ \frac{d\omega}{dx} &= 0 \text{ при } x = 0; \\ M_x &= -D \frac{d^2\omega}{dx^2} = 0 \text{ при } x = L; \\ Q_x &= -D \frac{d^3\omega}{dx^3} = 0 \text{ при } x = L. \end{aligned} \quad (24)$$

Записанное дифференциальное уравнение (23) с граничными условиями (24) представляет собой краевую задачу. Поэтому данное дифференциальное уравнение решаем методами позволяющими решить краевую задачу. Зная алгоритм метода пристрелки и алгоритм реализации метода Рунге-Кутты, запрограммируем решение задачи в пакете Mathematica 5.0, результаты которой представлены на рис. 3-13. Изначально была решена упругая задача, результаты которой представлены на рис. 3-5.

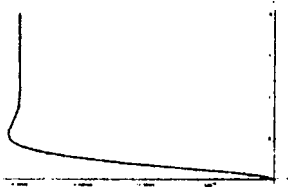


Рис. 3. Кривая зависимости прогиба от длины оболочки

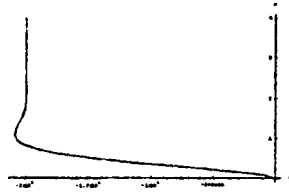


Рис. 4. Кривая зависимости напряжений от длины оболочки

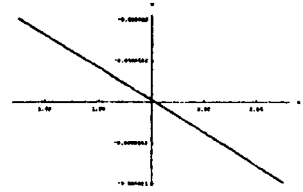


Рис. 5. Кривая зависимости перемещений от радиуса оболочки

Результаты, полученные по средствам компьютерной программы инженерных расчетов Mathematica 5.0 для задачи с учётом наружного давления, температурного расширения и радиационного распухания для различных временных интервалов нагружения представлены на рис. 6-15.

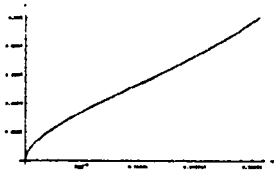


Рис. 6. Кривая зависимости прогиба от длины оболочки в момент времени $t=0$ ч.

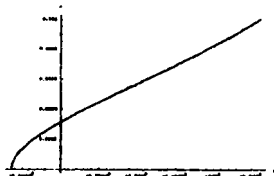


Рис. 7. Кривая зависимости напряжений от длины в момент времени $t=0$ ч.

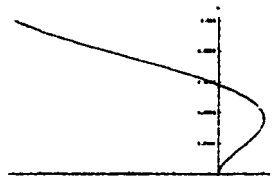


Рис. 8. Кривая зависимости прогиба от длины оболочки в момент времени $t=400$ ч.

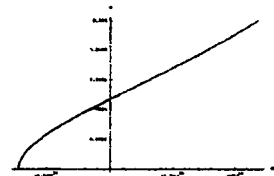


Рис. 9. Кривая зависимости напряжений от длины в момент времени $t=400$ часов

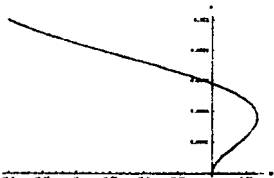


Рис. 10. Кривая зависимости прогиба от длины оболочки в момент времени $t=800$ ч.

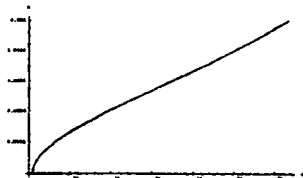


Рис. 11. Кривая зависимости напряжений от длины в момент времени $t=800$ ч.

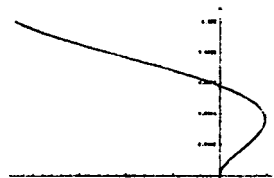


Рис. 12. Кривая зависимости прогиба от длины оболочки в момент времени $t=1000$ ч.

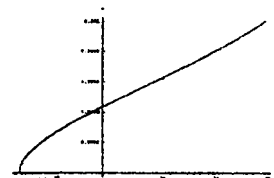


Рис. 13. Кривая зависимости напряжений от длины в момент времени $t=1000$ ч.

Из полученных графических зависимостей можно заключить, что с увеличением срока эксплуатации оболочки будут увеличиваться и значения перемещений, на что существенно влияет фактор объемного радиационного распухания, в запись уравнения которого входит параметр времени, связанный прямо пропорциональной зависимостью со значением радиационных деформаций $S(T(r,Z), \phi t)$.

Для проверки правильности составленного алгоритма решения дифференциального уравнения, сравним результаты, полученные для упругой задачи (действует только наружное давление), при ее реализации в пакете Mathematica 5.0 с результатами аналогичной задачи, смоделированной в инженерном программном комплексе ANSYS Workbench. Значения прогибов по длине оболочки, полученные в пакете Mathematica (рис. 4) совпадают с прогибами, полученными средствами CAE в пакете ANSYS (рис. 14), что, в свою очередь, говорит о правильности численного решения.

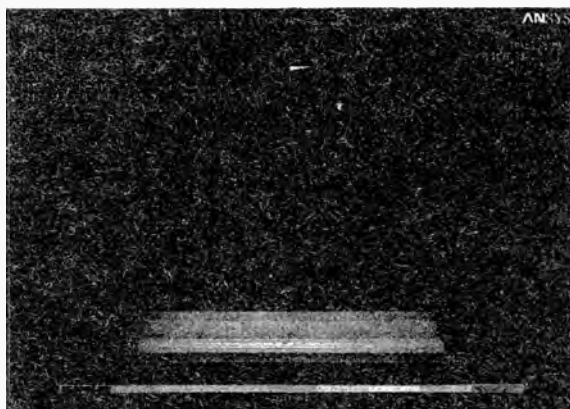


Рис. 14. Распределение прогибов в оболочке

В конечном результате исследований можно заключить следующее – получены разрешающие дифференциальные уравнения, разработана математическая модель и алгоритм нахождения основных характеристик НДС оболочки, запрограммирована компьютерная программа нахождения решения поставленной терморadiационной квазистатической задачи, построены графические зависимости прогибов и напряжений от длины оболочки. Проведен сравнительный анализ результатов механической задачи с решением в программной среде МКЭ ANSYS, показавший идентичность значений, что, в свою очередь, говорит о правильности составленного дифференциального уравнения и выборе численного метода решения рассматриваемой задачи исследования НДС. Заметим, что данная работа, как и все работы по аналогичной тематике, заслуживают высокого внимания по причине, того, что в настоящее время в Республике Беларусь развивается собственная ядерная программа, первыми шагами которой является воздвижение атомной электростанции. Результаты предлагаемого исследования имеют как теоретическую, так и практическую значимость, позволяя корректно описывать напряжённо-деформированное состояние важных элементов конструкций энергоблоков АЭС, в том числе в ряде аварийных ситуаций. А разработанная теория может стать основой для решения конкретных прикладных задач в области атомного машиностроения.

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 выполнена при поддержке гранта БФФИ № Т09М-090 (№ госрегистрации: 20091888). Тема: «Моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек при неравномерном нагреве и нейтронном облучении».

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов В.П., Драгунов Ю.Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИздАТ, 2002. – 480 с. 2. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248с. 3. Займовский А.С. Тепловыделяющие элементы атомного реактора/ А.С. Займовский, В.В. Калашников, И.С. Головин. – М.: Атомиздат, 1979. – 517с. 4. Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С.Куликов, Б.Е. Тверковкин.- Мн.: Наука и техника, 1984. – 104с.

УДК 539.3

Язневич А.М.

ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИИ НА ПРОЧНОСТЬ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Методы расчета строительных конструкций позволяют учесть все возможные неблагоприятные нагрузки. Случаются ошибки при проектировании и изготовлении конструкций, а также при нарушении расчетного режима эксплуатации. Одной из опасных ошибок является недоучет влияния коррозии на арматуру.

Коррозией металлов называется химическое разрушение, обусловленное взаимодействием металлических материалов с окружающей средой. В процессе коррозии протекают реакции окисления-восстановления, в которых окислителем является среда, соприкасающаяся с металлами. При окислении происходит переход атомов металла из нейтрального состояния в положительно заряженные ионы, входящие в состав продуктов коррозии. Сталь не будет подвержена коррозии если электролит имеет достаточно высокий рН, что вызывает пассивацию поверхности стали. Состояние пассивности сохраняется в случае, если имеется динамическое равновесие между факторами, создающими защитную пленку и факторами, нарушающими ее сплошность (водородными и галогидными ионами, катодной поляризацией). При понижении рН электролита пассивное состояние нарушается – происходит процесс коррозии.

В плотном неповрежденном бетоне стальная арматура может находиться в сохранности на протяжении длительного срока эксплуатации конструкций при любых условиях влажности окружающей среды. Коррозия стали в бетоне возникает в результате нарушения ее пассивности, которое может быть вызвано основными факторами: действием хлорид-ионов, которые проникают к поверхности арматуры через трещины в бетоне, карбонизацией, трещинами. Хлориды снижают рН электролита и вызывают коррозию арматуры. Хлориды могут быть внесены в бетон добавками или мигрировать извне, с течением времени. Карбонизация защитного слоя бетона тоже уменьшает рН электролита, что вызывает коррозию арматуры. Чем больше пористость бетона, тем выше скорость карбонизации. Трещины в бетоне, облегчают доступ внешней агрессивной среды к поверхности арматуры, что тоже приводит к коррозии арматуры.

В настоящее время при производстве стержневой арматуры для железобетонных конструкций прослеживается устойчивая тенденция к снижению расхода дорогостоящих легирующих элементов при одновременном повышении прочности проката. Обеспечение высоких прочностных свойств достигается быстрым охлаждением арматуры в потоке сортовых станов на специальной установке термического упрочнения. Установлено, что в результате термического упрочнения по режиму прерывистой закалки арматуры ОАО «ЗСМК» в сечении стержней формируется градиентная структура в виде пяти соосно расположенных структурных слоев [1]. Выделенные при исследовании слои названы поверхностным, переходным и осевым (рис.1).