

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 19. Выпуск 1

УДК 624.04

DOI 10.22405/2226-8383-2018-19-1-35-43

Осесимметричное деформирование направленно армированной оболочки в условиях радиационного облучения

Гарибов Рафаил Баширович — доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Балаковский инженерно-технологический институт (филиал).

e-mail: rbgaribov@mephi.ru

Овчинников Игорь Георгиевич — доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Балаковский инженерно-технологический институт (филиал).

Аннотация

Рассматривается задача моделирования поведения армированной бетонной цилиндрической оболочки в условиях радиационного облучения. Получены разрешающие уравнения для оболочки, учитывающие совместное действие нагрузки и радиационного облучения. Считается, что механические характеристики бетона и арматуры зависят от дозы облучения. Учитывается также неодинаковая работа бетона на растяжение и сжатие. При выводе используется прием замены дискретного армирования в каждом направлении некоторым эквивалентным слоем. Для решения полученных уравнений предложено использовать шаговую по времени методику с нахождением на каждом шаге закона распределения дозы облучения по телу оболочки, деформации распухания, а по ним законов распределения механических характеристик бетона и арматуры с учетом влияния облучения и характера напряженного состояния.

Ключевые слова: армобетонная цилиндрическая оболочки, радиационное облучение, доза облучения, радиационное распухание.

Библиография: 23 названия.

Для цитирования:

Р. Б. Гарибов, И. Г. Овчинников. Осесимметричное деформирование направленно армированной оболочки в условиях радиационного облучения // Чебышевский сборник, 2018, т. 19, вып. 1, с. 35–43.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 19. No. 1

UDC 624.04

DOI 10.22405/2226-8383-2018-19-1-35-43

Axisymmetric deformation of a reinforced shell in the conditions of radiation exposure

Garibov Rafail Bashirovich — doctor of technical sciences, professor, National Research Nuclear University "MEPhI" Balakovo Engineering and Technology Institute (branch).

e-mail: rbgaribov@mephi.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich — doctor of technical sciences, professor, National Research Nuclear University "MEPhI" Balakovo Engineering and Technology Institute (branch).

Abstract

The problem of modeling the behavior of reinforced concrete cylindrical shell under conditions of radiation exposure is considered. Solving equations for the shell are obtained, taking into account the joint action of the load and radiation exposure. It is believed that the mechanical characteristics of concrete and reinforcement depend on the radiation dose. The work of concrete on tension and compression is also taken into account. In the output, a method is used to replace the discrete reinforcement in each direction with an equivalent layer. To solve the equations, it was suggested to use a time-stepping technique with finding at each step the law of distribution of the irradiation dose over the body of the shell, the swelling deformation, and according to them the laws of distribution of the mechanical characteristics of concrete and reinforcement, taking into account the effect of irradiation and the nature of the stress state.

Keywords: reinforced concrete cylindrical shell, radiation exposure, dose of radiation, radiation swelling.

Bibliography: 23 titles.

For citation:

R. B. Garibov, I. G. Ovchinnikov, 2018, "Axisymmetric deformation of a reinforced shell in the conditions of radiation exposure *Chebyshevskii sbornik*, vol. 19, no. 1, pp. 35–43.

1. Введение

Разработка математических моделей, описывающих поведение конструкций с учётом воздействия радиационных факторов производится в следующей последовательности [1, 2, 3]:

1. Выбираются параметры, характеризующие состояние материала конструкции в процессе деформирования и разрушения, а также параметры, которые характеризуют внешние воздействия – нагрузку, температуру, радиационное воздействие. Строятся уравнения состояния, то есть соотношения, связывающие характеристики процессов деформирования и разрушения с остальными параметрами; строятся кинетические уравнения, описывающие изменение этих параметров, которые характеризуют воздействие нагрузки, температуры, радиационной среды; формулируется условие локального разрушения (например, достижение параметром некоторого критического значения).

2. Формулируются условия проведения экспериментов, используя результаты которых можно провести идентификацию моделей, то есть можно с использованием результатов эксперимента определить коэффициенты моделей так, чтобы эти модели достаточно корректно описывали экспериментальное поле данных.

3. Формулирование краевой задачи, которая позволяет описать процесс деформирования и разрушения оболочки в заданных условиях (то есть на этом этапе выводятся уравнения цилиндрических оболочек, которые учитывают и свойства материала, из которого сделан конструктивный элемент и внешние факторы, которые действуют на материал через границы элемента).

4. Постановка численных экспериментов и исследование поведения конструктивных элементов при различных комбинациях внешних факторов (нагрузка, радиационная среда, температура). Проверка модели путём сопоставления результатов расчёта полученных с использованием моделей, с другими экспериментальными данными.

Процесс взаимодействия нагруженных элементов конструкций с радиационной средой можно свести к следующей схеме. В материале конструктивного элемента под действием нагрузки протекают два взаимосвязанных процесса – деформирование и разрушение. Причём деформирование может происходить как за счёт ползучести материала, так и за счёт роста дефектов и других повреждений, которые оказывают влияние на механические свойства материалов и приводят к изменению деформированного состояния тела. Под влиянием радиационной среды по объёму конструктивного элемента по некоторому закону распределяется доза облучения, приводя к изменению кратковременных и длительных механических характеристик и к радиационному распуханию. В результате изменяется процесс деформирования конструкции и кинетика её разрушения. Для описания процессов деформирования обычно используется система параметров, которая включает: напряжение σ , деформацию ε , температуру T , время t . Эта система в случае, когда мы хотим описать процесс деформирования и разрушения в радиационной среде оказывается недостаточно полной. Для более корректного описания в дополнение к указанным выше параметрам вводится параметр поврежденности Π , параметр радиационного распухания, параметр – доза нейтронного облучения Φ .

Конструктивные элементы, работающие в условиях радиационного облучения, нередко выполняются из армированного бетона в форме цилиндрических оболочек, в качестве расчетной схемы для них используется модель деформирования цилиндрической оболочки – либо осесимметричной, либо полубезмоментной. В указанных расчетных схемах материал находится в условиях плоского напряженного состояния. Поэтому рассмотрим физические соотношения для плоского напряженного состояния для железобетона с учетом воздействия радиационного облучения.

Армированный материал (железобетон) является ортотропным материалом, неодинаково сопротивляющимся деформациям растяжения и сжатия, причём бетон и арматура имеют близкие коэффициенты линейного расширения. Но бетон имеет отличающиеся при растяже-

нии и сжатии диаграммы деформирования, поэтому для описания поведения армированного бетона, будем использовать составную модель ортотропного армированного нелинейного разномодульного материала.

2. Основная часть

Физические соотношения, описывающие поведение материала в условиях плоского напряжённого состояния, складываются из физических соотношений для бетона, работающего в условиях плоского напряженного состояния и физических соотношений для арматуры, которая работает в условиях одноосного напряженного состояния для каждого направления армирования.

Физические соотношения для бетона принимаем в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_\alpha^b &= \frac{\Psi_j^b}{1 - (\nu_j^b)^2} (e_\alpha + \nu_j^b e_\beta) - (1 + \nu_j^b) \cdot \Psi_j^b \cdot \varepsilon_\Phi^b, \\ \sigma_\beta^b &= \frac{\Psi_j^b}{1 - (\nu_j^b)^2} (e_\beta + \nu_j^b e_\alpha) - (1 + \nu_j^b) \cdot \Psi_j^b \cdot \varepsilon_\Phi^b, \\ \tau_{\alpha\beta}^b &= \frac{\Psi_j^b}{2(1 + \nu_j^b)} e_{\alpha\beta}.\end{aligned}$$

где $\sigma_\alpha^b, \sigma_\beta^b, \tau_{\alpha\beta}^b$ - компоненты тензора напряжений в бетоне, $e_\alpha, e_\beta, e_{\alpha\beta}$ - компоненты тензора деформаций, ν_j^b - коэффициент поперечной деформации бетона, $j=1,2$, причём $j=1$ при $\sigma_0 \geq 0$ и $j=2$ при $\sigma_0 < 0$.

Функция Ψ_j^b - имеет вид:

$$\Psi_j^b = \frac{\sigma_{uj}^b(e_u, \Phi)}{e_u}, j = 1, 2. \quad (1)$$

Влияние радиационного облучения учитывается введением радиационной деформации распухания бетона ε_Φ^b , а также влиянием флюенса на характер кривой деформирования.

Если бетон упруго работает на растяжение и сжатие, то функция Ψ_j^b (2) может быть принята в виде:

$$\Psi_j^b = \begin{cases} E_j^b & , \Phi < \Phi_{1\text{пор}} \\ E_j^b(\Phi) & , \Phi \geq \Phi_{1\text{пор}} \end{cases}, j = 1 \text{ при } \sigma_0^b \geq 0, j = 2 \text{ при } \sigma_0^b \leq 0 \quad (2)$$

где зависимость модуля упругости бетона от флюенса нейтронов $E_j^b(\Phi)$ может быть представлена в виде

$$E_j^b(\Phi) = E_{0j}^b \cdot f_2(\Phi) \quad (3)$$

где $E_j^b(\Phi)$ - величина модуля упругости бетона после облучения флюенсом нейтронов Φ ; E_{0j}^b - начальное значение модуля упругости; $f_2(\Phi)$ - функция влияния. Физические соотношения для арматуры запишем в виде:

$$\text{а) для направления } \alpha : \sigma_\alpha^a = \Psi^a \cdot e_\alpha - \Psi^a \cdot \varepsilon_\Phi^a; \quad (4)$$

$$\text{б) для направления } \beta : \sigma_\beta^a = \Psi^a \cdot e_\beta - \Psi^a \cdot \varepsilon_\Phi^a; \quad (5)$$

Здесь $\Psi^a = \frac{\sigma^a(e, \Phi)}{e}$, e - деформация арматуры, принимаемая e_α - для направления α , e_β - для направление β .

Функция $\Psi^a(e, \Phi)$ может быть принята в виде:

$$\Psi^a(e, \Phi) = a(\Phi) \cdot e^{m(\Phi)-1} \text{ или } \Psi^a = \begin{cases} E^a(\Phi) & , \sigma^a < \sigma_T^a \\ 0 & , \sigma^a > \sigma_T^a \end{cases}, \quad (6)$$

а деформации распухания бетона $\varepsilon_{\Phi}^{\delta}$,

$$\varepsilon_{\Phi}^{\delta} = \begin{cases} 0 & , \Phi < \Phi_{2\text{пор}} \\ \delta \cdot \varepsilon_{\text{max}} \times \frac{\exp(\nu \cdot (\Phi - \Phi_{\text{пор}}))}{\varepsilon_{\text{max}} + \delta \cdot \exp(\nu \cdot (\Phi - \Phi_{\text{пор}}))} & , \Phi \geq \Phi_{2\text{пор}} \end{cases}, \quad (7)$$

Получим теперь уравнения осесимметричного деформирования направленно армированной оболочки, подвергающейся радиационному облучению. При действии радиальной нагрузки P_n и нагрузки P_{α} , действующей вдоль образующей, уравнения равновесия элемента оболочки будут иметь вид [4, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{\alpha}}{\partial \alpha} - N_{\beta} + RP_n &= 0, \\ \frac{\partial N_{\alpha}}{\partial \alpha} + RP_{\alpha} &= 0, \\ \frac{\partial M_{\alpha}}{\partial \alpha} + Q_{\alpha}R &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь N_{α} и N_{β} нормальные усилия в продольном (α) окружном (β) направлении, M_{α} и Q_{α} изгибающий момент и перерезывающая сила, R – радиус оболочки (рис.1).

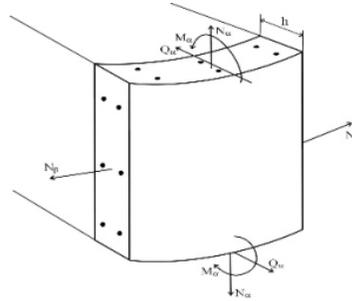


Рис. 1: Действие внутренних усилий на элемент армированной оболочки

Эта система сводится к двум дифференциальным уравнениям:

$$\frac{\partial^2 M_{\alpha}}{\partial \alpha^2} - RN_{\beta} + R^2 P_n = 0, \quad \frac{\partial N_{\alpha}}{\partial \alpha} + RP_{\alpha} = 0, \quad (9)$$

Полагая справедливыми гипотезы Кирхгофа-Лява, можно записать:

$$e_{\alpha}(z) = \varepsilon_{\alpha} + z\chi_{\alpha}, \quad e_{\beta}(z) = \varepsilon_{\beta} + z\chi_{\beta}, \quad e_{\alpha\beta}(z) = 0. \quad (10)$$

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \alpha}, \quad \varepsilon_{\beta} = \frac{W}{R}, \quad \chi_{\alpha} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2}, \quad \chi_{\beta} = 0, \quad (11)$$

Здесь обозначено: $e_{\alpha}(z)$, $e_{\beta}(z)$, $e_{\alpha\beta}(z)$ – деформации слоя оболочки на расстоянии z от срединной поверхности; ε_{α} , ε_{β} – относительные деформации точек срединной поверхности; $u(\alpha)$, $W(\alpha)$ – перемещения точек срединной поверхности соответственно по направлениям координат α и z . Получим выражения для изгибающего момента и нормальных усилий армированной оболочки, полагая, что они складываются из моментов и усилий, воспринимаемых

бетоном, и моментов и усилий, воспринимаемых арматурой:

$$\begin{aligned} M_\alpha &= M_\alpha^a + M_\alpha^b, \\ N_\alpha &= N_\alpha^a + N_\alpha^b, \\ N_\beta &= N_\beta^a + N_\beta^b. \end{aligned} \quad (12)$$

Выражения для частей моментов и усилий, воспринимаемых бетоном:

$$\begin{aligned} M_\alpha^b &= \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \sigma_{\alpha j}^b z dz + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \sigma_{\alpha i}^b z dz, \\ N_\alpha^b &= \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \sigma_{\alpha j}^b dz + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \sigma_{\alpha i}^b dz, \\ N_\beta^b &= \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \sigma_{\beta j}^b dz + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \sigma_{\beta i}^b dz. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь z_0 - уравнение нейтральной поверхности, определяемой из условия $\sigma_0 = 0$ и отделяющей растянутую зону оболочки от сжатой; h – толщина оболочки, i, j - индексы, характеризующие сжатую и растянутую зоны оболочки. Если нижняя зона изгибаемой оболочки растянута, то $j = 1, i = 2$; если нижняя зона изгибаемой оболочки сжата, а верхняя растянута, то $j = 2, i = 1$. Выражения для z_0 получается из условия:

$$\sigma_0^b = \frac{\sigma_\alpha^b + \sigma_\beta^b}{3} = 0. \quad (14)$$

подставляя в которое выражения для σ_α и σ_β из (1), после некоторых преобразований найдём: $(e_\alpha + e_\beta) = 2(1 - \nu^2) \cdot \varepsilon_\Phi$ и учитывая (1):

$$z_0 = -\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{\chi_x + \chi_y} + \frac{2(1 - \nu_{cp}^2) \cdot \varepsilon_\Phi}{\chi_x + \chi_y}. \quad (15)$$

С учетом соотношений (1) и (3) выражения (14) после некоторых преобразований примут вид:

$$\begin{aligned} M_\alpha^b &= \varepsilon_\alpha J_1^b + \varepsilon_\beta I_1^b + \chi_\alpha J_2^b + \chi_\beta I_2^b + \Delta M_\Phi^b; \\ N_\alpha^b &= \varepsilon_\alpha J_0^b + \varepsilon_\beta I_0^b + \chi_\alpha J_1^b + \chi_\beta I_1^b + \Delta N_\Phi^b; \\ N_\beta^b &= \varepsilon_\beta J_0^b + \varepsilon_\alpha I_0^b + \chi_\alpha J_1^b + \chi_\beta I_1^b + \Delta M_\Phi^b. \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} J_k^b &= \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} a_j \cdot z^k dz + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} a_i \cdot z^k dz \text{ при } k = 0, 1, 2; \\ I_k^b &= \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} a_j \cdot \nu_j z^k dz + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} a_i \cdot \nu_i z^k dz \text{ при } k = 0, 1, 2. \end{aligned} \quad (17)$$

в которых

$$a_j = \frac{\Psi_j^b}{1 - (\nu_j)^2}, \quad a_i = \frac{\Psi_i^b}{1 - (\nu_i)^2}. \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta M_\Phi^b &= - \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} (1 - \nu_j) \Psi_j e_\Phi z dz - \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} (1 - \nu_j) \Psi_j e_\Phi z dz \\ \Delta N_\Phi^b &= - \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} (1 - \nu_j) \Psi_j e_\Phi dz - \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} (1 - \nu_j) \Psi_j e_\Phi dz. \end{aligned} \quad (19)$$

Для получения выражений для моментов и усилий, воспринимаемых арматурой, заменим арматурные стержни в направлении координаты α и β сплошными эквивалентными слоями металла (рис.2).

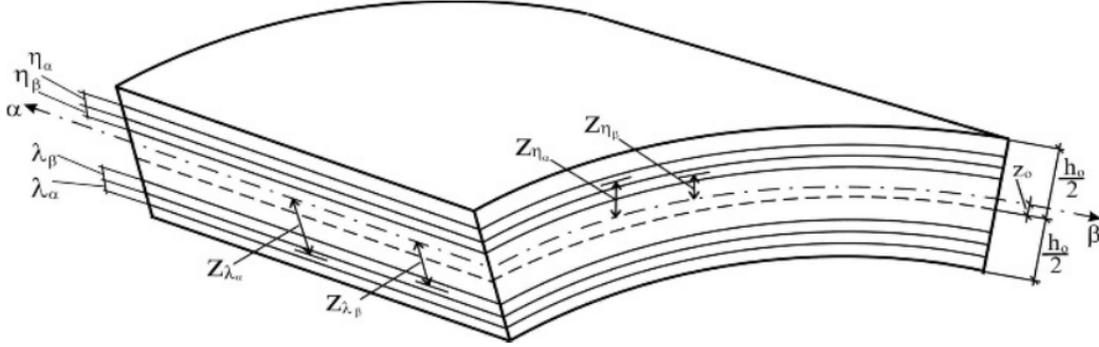


Рис. 2: Замена арматурных стержней эквивалентными слоями

Обозначим η_α и η_β - толщины эквивалентных армирующих слоев в верхней части оболочки, эквивалентных арматуре в направлениях, соответственно α , и β ; λ_α , и λ_β - толщины эквивалентных армирующих слоев в нижней части оболочки, эквивалентных арматуре в направлениях, соответственно α , и β ; z_{η_α} и z_{η_β} - ординаты центров тяжести эквивалентных армирующих слоев толщиной соответственно η_α и η_β в верхней части оболочки; z_{λ_α} , и z_{λ_β} - ординаты центров тяжести эквивалентных армирующих слоев толщиной соответственно λ_α , и λ_β в нижней части оболочки. С учетом введенных гипотез выражения для части моментов и усилий, воспринимаемых арматурой, примут вид:

$$\begin{aligned} M_\alpha^a &= \sigma_\alpha^a(z_{\lambda_\alpha})\lambda_\alpha z_{\lambda_\alpha} + \sigma_\alpha^a(z_{\eta_\alpha})\eta_\alpha z_{\eta_\alpha}, \\ N_\alpha^a &= \sigma_\alpha^a(z_{\lambda_\alpha})\lambda_\alpha + \sigma_\alpha^a(z_{\eta_\alpha})\eta_\alpha, \\ N_\beta^a &= \sigma_\beta^a(z_{\lambda_\beta})\lambda_\beta + \sigma_\beta^a(z_{\eta_\beta})\eta_\beta, \end{aligned} \quad (20)$$

Здесь $\sigma_\alpha^a(z_{\lambda_\alpha})$ - напряжение в эквивалентном армирующем слое, работающем в направлении оси α и расположенном в нижней части оболочки на расстоянии z_{λ_α} от срединной поверхности; $\sigma_\alpha^a(z_{\eta_\alpha})$ - напряжение в эквивалентном армирующем слое, работающем в направлении оси α и расположенном в верхней части оболочки на расстоянии z_{η_α} от срединной поверхности; $\sigma_\beta^a(z_{\lambda_\beta})$ - напряжение в эквивалентном армирующем слое, работающем в направлении оси β и расположенном в нижней части пластины на расстоянии z_{λ_β} от срединной поверхности; $\sigma_\beta^a(z_{\eta_\beta})$ - напряжение в эквивалентном армирующем слое, работающем в направлении оси β и расположенном в верхней части оболочки на расстоянии z_{η_β} от срединной поверхности. С учетом физических соотношений для арматуры:

$$\sigma_\alpha^a = E^a \cdot e_\alpha - E^a \cdot \varepsilon_\Phi^a, \quad (21)$$

$$\sigma_\beta^a = E^a \cdot e_\beta - E^a \cdot \varepsilon_\Phi^a, \quad (22)$$

выражения для части моментов и усилий, воспринимаемых арматурой, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} M_\alpha^a &= [E^a(\varepsilon_\alpha + z_{\lambda_\alpha}\chi_\alpha) - E^a\varepsilon_\Phi^a]\lambda_\alpha z_{\lambda_\alpha} + [E^a(\varepsilon_\alpha + z_{\eta_\alpha}\chi_\alpha) - E^a\varepsilon_\Phi^a]\eta_\alpha z_{\eta_\alpha}, \\ N_\alpha^a &= [E^a(\varepsilon_\alpha + z_{\lambda_\alpha}\chi_\alpha) - E^a\varepsilon_\Phi^a]\lambda_\alpha + [E^a(\varepsilon_\alpha + z_{\eta_\alpha}\chi_\alpha) - E^a\varepsilon_\Phi^a]\eta_\alpha, \\ N_\beta^a &= [E^a(\varepsilon_\beta + z_{\lambda_\beta}\chi_\beta) - E^a\varepsilon_\Phi^a]\lambda_\beta + [E^a(\varepsilon_\beta + z_{\eta_\beta}\chi_\beta) - E^a\varepsilon_\Phi^a]\eta_\beta. \end{aligned} \quad (23)$$

Вводя обозначения:

$$\begin{aligned} J_{k\alpha}^a &= E^a(\lambda_\alpha z_{\lambda_\alpha}^k + \eta_\alpha z_{\eta_\alpha}^k), k = 0, 1, 2; \\ J_{k\beta}^a &= E^a(\lambda_\beta z_{\lambda_\beta}^k + \eta_\beta z_{\eta_\beta}^k), k = 0, 1, 2; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \Delta M_\alpha^a &= -E^a \varepsilon_\Phi^a + (z_{\lambda_\alpha} \lambda_\alpha + z_{\eta_\alpha} \eta_\alpha), \\ \Delta N_\alpha^a &= -E^a \varepsilon_\Phi^a + (\lambda_\alpha + \eta_\alpha), \\ \Delta N_\beta^a &= -E^a \varepsilon_\Phi^a + (\lambda_\beta + \eta_\beta), \end{aligned} \quad (25)$$

запишем:

$$\begin{aligned} M_\alpha^a &= \varepsilon_\alpha J_{1\alpha}^a + \chi_\alpha J_{2\alpha}^a + \Delta M_\alpha^a; \\ N_\alpha^a &= \varepsilon_\alpha J_{0\alpha}^a + \chi_\alpha J_{1\alpha}^a + \Delta N_\alpha^a; \\ N_\beta^a &= \varepsilon_\beta J_{0\beta}^a + \chi_\beta J_{1\beta}^a + \Delta N_\beta^a; \end{aligned} \quad (26)$$

С учетом полученных выражений полные моменты и усилия примут вид:

$$\begin{aligned} M_\alpha &= M_\alpha^\beta + M_\alpha^a = \varepsilon_\alpha (J_1^\beta + J_{1\alpha}^a) + \chi_\alpha (J_2^\beta + J_{2\alpha}^a) + \varepsilon_\beta I_1^\beta + \chi_\beta I_2^\beta + \Delta M_\alpha^\Phi; \\ N_\alpha &= N_\alpha^\beta + N_\alpha^a = \varepsilon_\alpha (J_0^\beta + J_{0\alpha}^a) + \chi_\alpha (J_1^\beta + J_{1\alpha}^a) + \varepsilon_\beta I_0^\beta + \chi_\beta I_1^\beta + \Delta M_\alpha^\Phi; \\ N_\beta &= N_\beta^\beta + N_\beta^a = \varepsilon_\beta (J_0^\beta + J_{0\beta}^a) + \chi_\beta (J_1^\beta + J_{1\beta}^a) + \varepsilon_\alpha I_0^\beta + \chi_\alpha I_1^\beta + \Delta M_\beta^\Phi; \end{aligned} \quad (27)$$

Подставляя выражения из (28) в уравнения в (10) и учитывая (12) получим разрешающие интегро-дифференциальные уравнения, описывающие осесимметричную деформацию армированной оболочки в условиях радиационного воздействия:

$$\begin{aligned} D_1 \frac{\partial^4 W}{\partial \alpha^4} + 2D_2 \frac{\partial^3 W}{\partial \alpha^3} + D_3 \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2} + D_4 \frac{\partial W}{\partial \alpha} + D_5 W = \\ = R^4 P_n - F_1 \frac{\partial^3 u}{\partial \alpha^3} + F_2 \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} + F_3 \frac{\partial u}{\partial \alpha} - R^2 \frac{\partial^2 \Delta M_\alpha^\Phi}{\partial \alpha^2} + R^3 \Delta N_\beta^\Phi \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} G_1 \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} + G_2 \frac{\partial u}{\partial \alpha} = \\ = R^2 P_\alpha - K_1 \frac{\partial^3 W}{\partial \alpha^3} - K_2 \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2} - K_3 \frac{\partial W}{\partial \alpha} - K_4 W - R \frac{\partial \Delta M_\alpha^\Phi}{\partial \alpha} \end{aligned} \quad (29)$$

в которых

$$\begin{aligned} D_1 &= (J_2^\beta + J_{2\alpha}^a), D_2 = (J_2^\beta + J_{2\alpha}^a)', D_3 = [(J_2^\beta + J_{2\alpha}^a)'' + R(I_1^\beta)'], \\ D_4 &= R(I_1^\beta)', D_5 = [R(I_1^\beta)'' - R^2(J_0^\beta + J_{0\beta}^a)], F_1 = R(J_1^\beta + J_{1\alpha}^a), \\ F_2 &= 2R(J_1^\beta + J_{1\alpha}^a), F_3 = R(J_1^\beta + J_{1\alpha}^a)'' - R^2(I_0^\beta)', \\ G_1 &= J_0^\beta + J_{0\alpha}^a, G_2 = (J_0^\beta + J_{0\alpha}^a)', \\ K_1 &= \frac{1}{R}(J_1^\beta + J_{1\alpha}^a), K_2 = \frac{1}{R}(J_1^\beta + J_{1\alpha}^a)', K_3 = I_0^\beta, K_4 = (I_0^\beta)' \end{aligned} \quad (30)$$

К уравнениям (30) с учетом (31) следует присоединить граничные условия: - для жёсткого защемления: $W = 0, \frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0, u = 0$; для шарнирного подвижного опирания: $W = 0, M_\alpha = 0, N_\alpha = 0$; для свободного края: $M_\alpha = 0, Q_\alpha = 0, N_\alpha = 0$.

3. Заключение

Для решения полученных уравнений следует использовать пошаговую (по времени) процедуру, в процессе реализации которой на каждом шаге сначала находится распределение дозы

облучения по телу оболочки и деформации распухания, затем находятся законы распределения механических характеристик бетона с учетом влияния облучения и характера напряженного состояния. После этого определяются переменные коэффициенты (31) и численными или вариационными методами решаются уравнения (29).

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филин А.П. Прикладная механика твёрдого деформируемого тела, т. 1. – М.: Наука, 1975. – 832 с.
2. Лихачев Ю. И., Пупко В. Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. – М. : Атомиздат. 1975 – 378 с.
3. Павлина В.С., Попович В.В., Максимович Г.Г. К вопросу о методологии физико-химической механики материалов // Физико-химическая механика материалов. 1980. № 3. - С. 5-14.
4. Власов В.З. Общая теория оболочек и её приложение в технике – М., Л.: Гостехтеориздат, 1949. – 784 с.
5. Филин А.П. Элементы теории оболочек. Л.: Стройиздат, 1987. – 383 с.

REFERENCES

1. Filin A.P., 1975. *Applied mechanics of a rigid deformable body* vol. 1. Moscow: Nauka. 832 p.
2. Likhachev Yu. I., Pupko V. Ya., 1975. *Strength of fuel elements of nuclear reactors*. M.: Atomizdat. 378 p.
3. Pavlina V. S., Popovich V. V., Maksimovich G. G., 1980. "To the question of the methodology of the physico-chemical mechanics of materials" *Physicochemical Mechanics of Materials*. № 3. P. 5-14.
4. Vlasov V. Z., 1949. *General theory of shells and its application in engineering* M., L. : Gostehteorizdat. 784 p.
5. Filin A. P., 1987. *Elements of the theory of shells*. L. : Stroiizdat, 383 p.