

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ НАГРЕВЕ И НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Клус С.А., Куликов И.С., Ширвель П.И.

Белорусский национальный технический университет, Минск

A cylindrical shell undergoing irregular temperature and radiation has been considered. The numerical solution has been proposed to solve the problem for fuel cladding under creep, thermal and radiation strains. A graphic distribution of deflections and stresses of a short cylindrical shell have been received.

Известно, что в ядерной энергетике широко распространены цилиндрические и сферические тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), которые представляют собой топливный керамический слой соответствующей геометрии, заключенный в тонкостенную металлическую оболочку, препятствующую утечке продуктов деления и разрушению элемента. В центре элемента имеется полость, где накапливается газообразные продукты деления, что приводит к возрастанию давления

внутри. Таким образом, оболочка нагружена как внешним давлением теплоносителя, так и давлением с внутренней полости [1]. ТВЭЛ работает при высокой температуре, поэтому явления упругого деформирования, пластичности, радиационной и тепловой ползучести, газового распухания топлива могут привести с течением времени к значительной суммарной деформации металлической оболочки и ее разрушению.

Отметим, что оболочка ТВЭЛ является наиболее ответственной конструкционной деталью активной зоны реактора, находящейся в сложных тепловых, механических, радиационных и химических условиях эксплуатации (коррозия от теплоносителя, распухание от пузырьков газообразных продуктов деления, радиационная и тепловая ползучесть, радиационное упрочнение, гелиевое охрупчивание). Главным требованием, предъявляемым к оболочкам ТВЭЛов, является длительное сохранение герметичности. Конструкция оболочки и ее толщина должны обеспечивать устойчивость под действием внешнего давления теплоносителя, прочность при термических и изгибных напряжениях, напряжениях от давления ГПД и действия распухающего

топливного сердечника, приходящего в контакт с оболочкой. Таким образом, важно знать значения напряжений, под действием которых оболочка еще выполняет функцию разделения топлива и теплоносителя (считается, что ТВЭЛ выходит из строя, когда оболочка разгерметизируется).

Изучение характера и степени возможных повреждений оболочек составляет одну из самых сложных проблем, учитывая, что до перегрузки ТВЭЛы должны работать до 9000 – 12 000 часов. Одним из способов решения является исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки с целью проверки надежной работоспособности конструкции ТВЭЛ. Данные элементы работают фак-

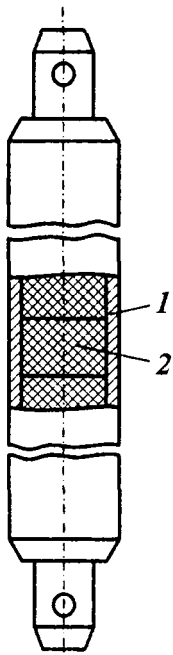


Рис. 1. Схема ТВЭЛ:
1 - оболочка; 2 - топливо
(UO₂)

тически в экстремальных условиях: подвержены значительным механическим, тепловым и радиационным нагрузкам. Заметим, что степень необратимых изменений, происходящих в оболочках под влиянием перечисленных факторов, во многом зависит от интенсивности и длительности нейтронного облучения, температуры облучения и характера ее изменения в процессе работы реактора, от исходной структуры и свойств материалов оболочек, а также от свойств теплоносителя и его гидравлических характеристик.

Одно из важных следствий эксплуатации оболочки твэла – возникновение значительных внутренних напряжений. Их появление связано с действием внешних статических, динамических и вибрационных нагрузок, со структурными изменениями под облучением, с распуханием оболочки, с неодинаковым температурным уровнем отдельных участков оболочки (вследствие неравномерности энерговыделения по объему), а также с температурными градиентами по сечению оболочки (возникающими благодаря наличию тепловых потоков от топлива к теплоносителю). Таким образом, в оболочках твэлов в процессе работы ядерного реактора могут возникать три типа напряжений [2]: вызываемые давлением теплоносителя, а также давлением распухающего топлива, находящегося в контакте с оболочкой; обусловленные стационарными и нестационарными температурными полями; от неравномерного распухания материала оболочки.

Рассмотрим модель НДС участка оболочки твэла ядерного реактора в пределах топливной таблетки (рис. 2), находящейся в неравномерном температурном поле под действием внешнего давления теплоносителя в условиях нейтронного облучения. Предполагается, что реактор вышел на полную мощность и начальное

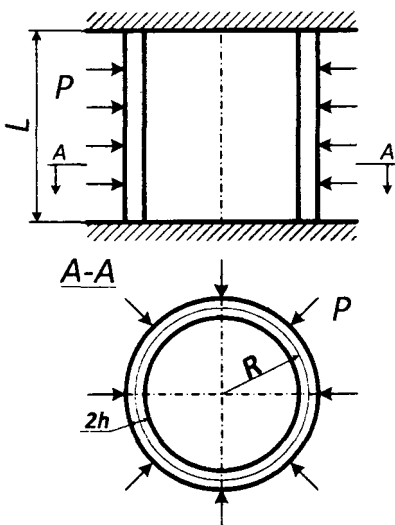


Рис. 2. Модель участка оболочки твэла

распределение температуры в оболочке к моменту выхода реактора на заданную мощность известно. Распределение температуры в оболочке считается стационарным во время всей кампании реактора. Моделирование будем производить при следующих условиях: температурное поле предполагается независимым от напряженного состояния оболочки; влияние изменений объема, вызванных напряжениями, на тепловое поле считается незначительным и в задаче не учитывается. При этом предполагаем, что теплофизические и механические характеристики материала остаются неизменными в интервале расчетных температур. Это относится и к прочностным свойствам материала. Принимаем во внимание тот факт, что облучение обычно мало влияет на значение упругих постоянных [3] и поэтому модуль

упругости и коэффициент Пуассона считаются зависящими только от температуры, причем $E(T)$ и $\nu(T)$ полагаются известными. В реальности для данного случая модуль Юнга, коэффициент Пуассона, а также коэффициент теплового расширения не зависят от температуры, поскольку в процессе работы реактора на постоянной мощности температура твэла обычно мало меняется, и поэтому можно использовать средние значения указанных характеристик (за исключением переходных процессов, например, выхода реактора на мощность или расхолаживания).

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

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{R} \frac{u_\varphi}{\partial\varphi} + \frac{\omega}{R}; \varepsilon_{x\varphi} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial u_x}{\partial\varphi} + \frac{\partial u_\varphi}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$\chi_{xx} = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}; \chi_{\varphi\varphi} = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial\varphi} \left(\frac{\partial\omega}{\partial\varphi} - u_\varphi \right); \chi_{x\varphi} = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial\omega}{\partial\varphi} - u_\varphi \right), \quad (2)$$

где u_x , u_φ – перемещения в осевом и окружном направлении соответственно, ω – прогиб оболочки.

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

$$\varepsilon^{(z)}_{xx} = \frac{\sigma_{xx} - \nu\sigma_{\varphi\varphi}}{E} + \varepsilon^T_{xx} + \frac{1}{3}\varepsilon^S_{xx}; \varepsilon^{(z)}_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma_{\varphi\varphi} - \nu\sigma_{xx}}{E} + \varepsilon^T_{\varphi\varphi} + \frac{1}{3}\varepsilon^S_{\varphi\varphi}, \quad (3)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{N_{xx}}{h} + \frac{12M_{xx}x}{h^3}; \sigma_{\varphi\varphi} = \frac{N_{\varphi\varphi}}{h} + \frac{12M_{\varphi\varphi}x}{h^3}, \quad (4)$$

$$N_{xx} = D_N (\varepsilon_{xx} + \nu\varepsilon_{\varphi\varphi} - (1+\nu)(\varepsilon^T_{xx} + \varepsilon^S_{xx})), \quad (5)$$

$$N_{\varphi\varphi} = D_N (\nu\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{\varphi\varphi} - (1+\nu)(\varepsilon^T_{\varphi\varphi} + \varepsilon^S_{\varphi\varphi})),$$

$$M_{xx} = D_M (\chi_{xx} + \nu\chi_{\varphi\varphi} - (1+\nu)(\chi^T_{xx} + \chi^S_{xx})), \quad (6)$$

$$M_{\varphi\varphi} = D_M (\nu\chi_{xx} + \chi_{\varphi\varphi} - (1+\nu)(\chi^T_{\varphi\varphi} + \chi^S_{\varphi\varphi})).$$

Здесь ε_{ij}^T – объемные термические деформации; ε_{ij}^S – объемные деформации радиационного распухания. Заметим, что в постановке рассматриваемой задачи присутствуют радиационное распухание оболочки. В общем случае оно представляет собой изменение объема материала оболочки под действием потока быстрых нейтронов, причем значительно меняет картину распределения деформаций и напряжений [4]. Термическое воздействие, в данной задаче, представляет собой неравномерный стационарный нагрев тонкостенной цилиндрической оболочки. Ввиду одновременного действия температуры и облучения происходят неравномерные объемные изменения оболочки (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 исследуемой оболочки.

Спроектируем силы (рис. 3) на оси x и z и найдём моменты сил относительно оси y . Положим, что внешние силы

действуют только лишь по нормали к поверхности оболочки. Из симметрии можно заключить, что сдвигающие силы ($N_{x\varphi} = N_{\varphi x}$), поперечные силы (Q_φ) и крутящие моменты ($M_{x\varphi} = M_{\varphi x}$) равны нулю. С учетом вышесказанного система уравнений равновесия примет следующий вид:

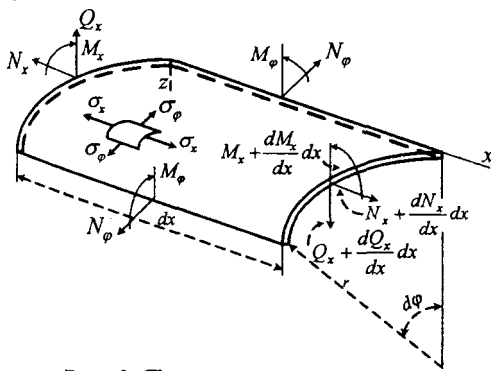


Рис. 3. Проекция сил и моментов в тонкостенной цилиндрической оболочке

$$\begin{cases} \frac{dN_x}{dx} r dx d\varphi = 0, \\ \frac{dQ_x}{dx} r dx d\varphi + N_\varphi dx d\varphi + q r dx d\varphi = 0, \\ \frac{dM_x}{dx} r dx d\varphi - Q_x r dx d\varphi = 0. \end{cases} \quad (7)$$

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

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

Влиянием сил N_x пренебрегаем ($N_x = const = 0$). Тогда уравнения (8) примут вид:

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

Продифференцируем второе уравнение системы уравнений (9) по x :

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} = \frac{dQ_x}{dx}. \quad (10)$$

Подставим уравнение (10) в первое уравнение системы (9):

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + \frac{N_\varphi}{r} = -q. \quad (11)$$

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

$$\varepsilon_{xx} = \frac{du_x}{dx}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{\omega}{r}, \quad \chi_{xx} = -\frac{d^2 \omega}{dx^2}. \quad (12)$$

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

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx} - \nu \sigma_{\varphi\varphi}}{E} + B(x), \\ \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma_{\varphi\varphi} - \nu \sigma_{xx}}{E} + B(x), \end{cases} \quad (13)$$

где $B(x)$ – функция учета неупругих объемных деформаций в оболочке:

$$B(x) = \alpha \Delta T(x) + \frac{1}{3} S[T(x), \varphi t]. \quad (14)$$

Выразим из системы уравнений (13) главные напряжения:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_{xx(z)} + \nu\varepsilon_{\varphi\varphi(z)} - B(x)(1+\nu)] \\ \sigma_{\varphi\varphi} = \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_{\varphi\varphi(z)} + \nu\varepsilon_{xx(z)} - B(x)(1+\nu)] \end{cases} \quad (15)$$

где

$$\varepsilon_{xx(z)} = \varepsilon_{xx} + z\chi_{xx}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi(z)} = \varepsilon_{\varphi\varphi} + z\chi_{\varphi\varphi}. \quad (16)$$

Выражение (15) устанавливает зависимость напряжений от упругих и терморадиационных деформаций.

Воспользуемся следующими формулами для определения нормальных сил и изгибающего момента:

$$N_{xx} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{xx} dz, \quad N_{\varphi\varphi} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{\varphi\varphi} dz, \quad M_{xx} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{xx} \cdot z \cdot dz. \quad (17)$$

Применим выражения (17) к системе (15), учитывая (16). Проведя интегрирование, получим следующую систему физических уравнений:

$$\begin{cases} N_{xx} = \frac{Eh}{1-\nu^2} [\varepsilon_{xx} + \nu\varepsilon_{\varphi\varphi} - B(x)(1+\nu)] \\ N_{\varphi\varphi} = \frac{Eh}{1-\nu^2} [\varepsilon_{\varphi\varphi} + \nu\varepsilon_{xx} - B(x)(1+\nu)] \\ M_{xx} = D[\chi_{xx} + \nu\chi_{\varphi\varphi}] \end{cases} \quad (18)$$

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

После подстановки в систему (19) соотношений Коши в виде (12) имеем:

$$\frac{du}{dx} = -\nu \frac{\omega}{r} + B(x)(1+\nu). \quad (19)$$

Подставляя (19) во второе уравнение системы (15), получаем $N_{\varphi\varphi}$. В конечном итоге получаем следующие выражения для усилий и моментов:

$$N_{\varphi\varphi} = Eh \left[\frac{\omega}{r} - B(x) \right], \quad (20)$$

$$M_{xx} = -D \frac{d^2\omega}{dx^2}. \quad (21)$$

Подставляя (20) и (21) в (11), получаем конечное уравнение для прогиба рассматриваемой оболочки:

$$D \frac{d^4\omega}{dx^4} - \frac{Eh}{r^2} \omega = q - \frac{Eh}{r} [B(x)] \quad (22)$$

Последнее выражение представляет собой уравнение равновесия для короткой цилиндрической оболочки, записанное через ее прогиб в условиях нейтронного облучения и термосилового воздействия.

Пример расчета

В качестве конкретного примера будем рассматривать напряженно-деформированное состояние участка оболочки твэла (в пределах топливной таблетки), изготовленной из холоднодеформированной аустенитовой стали

ОХ16Н15МЗБ (316L – зарубежный аналог). Механические характеристики материала исследуемой оболочки представлены в табл. 1. Таким образом, имеем, что оболочка внутренним радиусом $R_1=0,003$ м и внешним радиусом $R_2=0,0032$ м находится под действием: внутренних $P_B=7,5$ МПа и внешних $P_H=0,1$ МПа нагрузок в условиях нелинейных температурных и радиационных полей.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования оболочки конечной длины твэла

Величина	Значение
P – внешнее давление со стороны теплоносителя	0,1 МПа
E – модуль упругости материала оболочки	$1,5 \cdot 10^5$ МПа
ν – коэффициент Пуассона материала оболочки	0,3
λ – коэффициент теплопроводности материала оболочки	18 Вт/(м·К)
q_v – тепловыделение в единице объема материала оболочки	$2,20 \cdot 10^9$ Вт/м ³
α – коэффициент линейного расширения материала оболочки	$18,3 \cdot 10^{-6}$ град ⁻¹
ϕ – плотность нейтронного потока	$2,81 \cdot 10^{19}$ нейтрон/(см ² ·ч)

Функция радиационного распухания $S(T(x), \phi t)$, зависящая от температуры, времени и заданного нейтронного потока (флюенса нейтронов), для стали ОХ16М15НЗБ имеет вид [4]:

$$S(T(x), \phi t) = 4,9 \cdot 10^{-51} (\phi t)^{1,71} \cdot 10^{\frac{15490}{T(x)} + \frac{598 \cdot 10^4}{(T(x))^2}}. \quad (23)$$

Функция распределения температуры $T(x)$ задается интерполяцией значений экспериментального распределения температуры по поверхности оболочки твэла (табл. 2) для короткого участка оболочки длиной $L=10$ мм.

Таблица 2

Значения распределения температуры вдоль длины оболочки твэла

T, K	x_b, m										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
T_a	518	564	639	729	800	847	874	888	893	889	875
T_b	490	525	591	678	748	795	824	843	855	859	855

Отметим, что большинство физических процессов в активной зоне ядерного реактора описывается нелинейными уравнениями. Аналитическое решение подобных уравнений известно лишь для единичных случаев. Поэтому решение нелинейных задач сводится к использованию численных методов [5]. В качестве граничных условий задаем жесткое закрепление, где исследуемый слой оболочки зажат между двумя абсолютно жесткими поверхностями и благодаря взаимодействию соседних слоев принудительно обеспечивается условие неизменности толщины оболочки. Такие граничные условия в математической интерпретации имеют вид:

$$\begin{aligned} \omega &= 0 \text{ при } x = 0, L, \\ \frac{d\omega}{dx} &= 0 \text{ при } x = 0, L. \end{aligned} \quad (24)$$

Дифференциальное уравнение (22) с граничными условиями (24) представляет собой краевую задачу. Используя известные методы решения краевых задач

[6], проводим модельный расчет задачи в программном пакете MathCAD 14.0. Отметим, что на первых этапах расчета были получены значения распределения прогибов по длине оболочки (рис. 4) для простейшего случая (упругая механическая задача без учета терморadiационного воздействия), которые необходимо сравнить с другими решениями для аналогичной задачи.

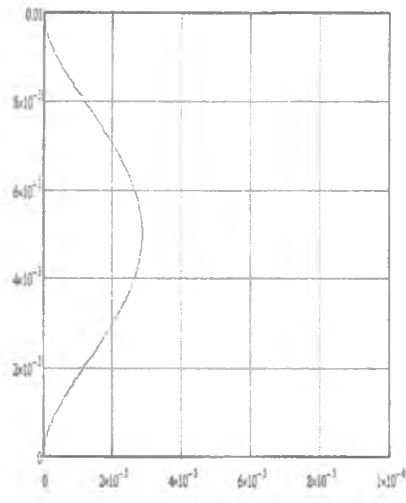


Рис. 4. Распределение прогибов по длине оболочки

Для проверки правильности и корректности составленного алгоритма программы (верификация программы), сравним результаты, полученные для термоупругой задачи (учитывается действие только

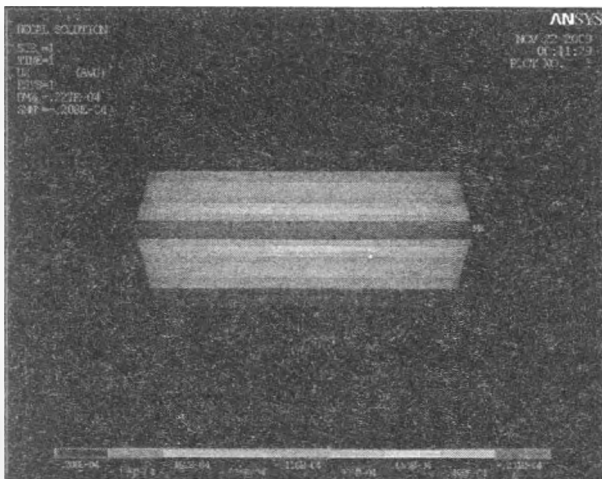


Рис. 5. Распределение прогибов в цилиндрической оболочке

наружного давления теплоносителя), при ее реализации в пакете MathCAD 14.0 с результатами аналогичной задачи, смоделированной в инженерном программном комплексе FEM ANSYS. В результате сравнения можно заключить, что значения прогибов по длине оболочки, полученные в расчетном модуле MathCAD (рис. 4) совпадают с прогибами, полученными средствами CAE в пакете ANSYS (рис. 5). Что, в свою очередь, говорит о правильности составленного алгоритма и выбора численного метода решения,

который соответственно может применяться и для решения поставленной квазистатической терморadiационноупругой задачи.

Результаты, полученные по средствам компьютерной программы, реализованной в пакете MathCAD 14.0 для механического анализа НДС оболочки с учётом наружного давления, температурного расширения и радиационного распухания для различных временных интервалов нагружения, представлены на рис. 6, 7.

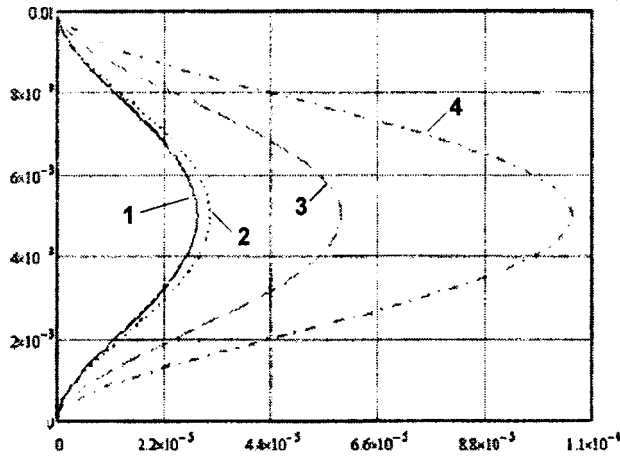


Рис. 6. Распределение прогибов по длине оболочки: 1 – при $t=0$ ч, 2 – при $t=1000$ ч, 3 – при $t=4000$ ч, 4 – при $t=7000$ ч

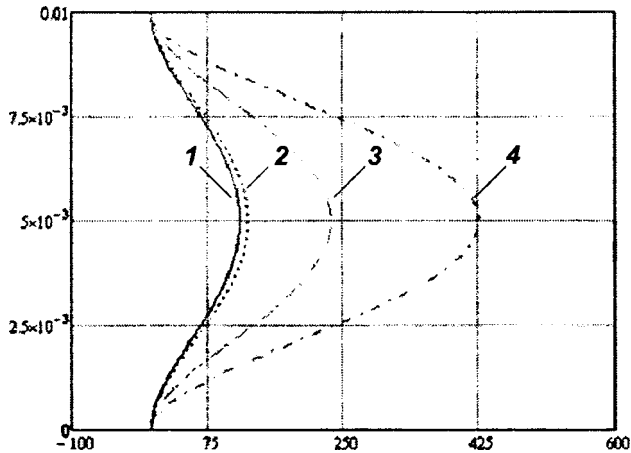


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений по длине оболочки: 1 – при $t=0$ ч, 2 – при $t=1000$ ч, 3 – при $t=4000$ ч, 4 – при $t=7000$ ч

Из полученных графических зависимостей можно заключить, что с увеличением срока эксплуатации оболочки твэла значительно увеличиваются значения прогибов и напряжений. Так значения прогибов оболочки после 7000 ч эксплуатации претерпели изменения (в сравнении с $t=0$ ч, где влияние радиационного распухания (23) не учитывается), увеличив свое значение в пять раз (см. рис. 6), а значения напряжений, в свою очередь, увеличились на 300 МПа (рис. 7). Такие большие изменения обусловлены влиянием фактора радиационного распухания, которое со временем становится весьма существенно (достигает 15 %), что необходимо учитывать, в первую очередь, при проектировании конструкций, для долговременной работы (7000–10 000 ч) во внутриреакторных условиях.

Вывод

- Рассмотрены вопросы расчета тонкостенной оболочки тепловыделяющего элемента ядерного реактора АЭС.
- Дана методика расчета напряженно-деформированного состояния.
- Получены разрешающие выражения в условиях нейтронного облучения и термосилового воздействия.
- Разработана механико-математическая модель и алгоритм нахождения основных характеристик НДС, реализована компьютерная программа нахождения

решения поставленной терморadiационной квазистатической задачи в пакете MathCAD 14.0.

- Приведены результаты модельных расчётов.
- Построены графические зависимости прогибов и напряжений по длине оболочки.
- Проведен сравнительный анализ полученных результатов в программной среде ANSYS.

Благодарности

- *Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ № T09M-090.*
- *Авторы работы выражают благодарность сотрудникам ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси Левчуку А.В. и Глембоцкому А.В. за помощь в обработке полученных результатов.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Займовский, А.С. Тепловыделяющие элементы атомного реактора / А.С. Займовский, В.В. Калашников, И.С. Головнин. – М.: Атомиздат, 1979. – 517 с.
2. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
3. Куликов, И.С. Прочность элементов конструкций при облучении / И.С. Куликов, В.Б. Нестеренко, Б.Е. Тверковкин. – Минск: Наука и техника, 1990. – 144 с.
4. Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов/И.С.Куликов, Б.Е. Тверковкин. – Минск: Наука и техника, 1984. – 104 с.
5. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. СПб.: Физматлит, 2002. – 630 с.
6. Рихтмайер, Р.Д. Разностные методы решения краевых задач / Р.Д. Рихтмайер, К. Мортон. – М.: Мир, 1972. – 418 с.