ФЭИ-741

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

В. Б. БОГУШ, В. В. ВАХРОМЕЕВА,
В. Е. КОЛЕСОВ, Ю. И. ЛИХАЧЕВ

Решение задачи кинетики напряженно-деформированного состояния цилиндрических ТВЭЛов с тонкостенными оболочками

Обнинск — 1977

ФЭИ - 741

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

В.Б.Богуш, В.В.Вахромеева,
В.Е.Колесов, Ю.И.Лихачев

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КИНЕТИКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТВЭЛОВ С ТОНКОСТЕННЫМИ ОБОЛОЧКАМИ

Обнинск - 1977

УДК 518 : 539.3
М-17

АННОТАЦИЯ

Описывается алгоритм решения задачи кинетики напряженно-деформированного состояния твэла, основанный на методе конечных разностей. Нелинейная зависимость между напряжениями и деформациями сводится к системе трансцендентных уравнений для функций, содержащих эту зависимость. Для улучшения устойчивости разностной схемы и сходимости метода прогонок при решении конечно-разностных уравнений вводится некоторый параметр регуляризации.

Рассматриваются цилиндрические осесимметричные стержневые (сплошные и полые) и кольцевые твэлы с тонкостенными оболочками. Вычисления проводятся с учетом деформаций пластичности и ползучести, распухания топлива и материала оболочки, давления теплоносителя и неравномерности температурного поля. Приводятся результаты расчетов.

I. Изучение работоспособности и надежности тепловыделяющих элементов ядерного реактора приводит к необходимости рассмотрения напряжений и деформаций, возникающих в элементах твэла при его работе.

Рассмотрим задачу о напряженно-деформированном состоянии цилиндрических стержневых (сплошных и с внутренней полостью) и кольцевых твэлов с металлическим топливом и тонкостенными оболочками. В процессе работы твэл испытывает воздействие меняющихся во времени внутренних сил, обусловленных распуханием топлива и конструкционных материалов, давления теплоносителя и неравномерного по радиусу температурного поля. Будем предполагать, что между оболочкой и сердечником твэла не возникает осевых и окружных смещений. Ограничимся случаем осевой симметрии и плоской деформации. Последнее допущение справедливо при небольших температурных градиентах по длине твэла.

Система уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние твэла, включает:

I.I. Уравнение равновесия

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \qquad (I)$$

с граничными условиями

$$\sigma_r = -P_{вн}(t) \quad \text{при} \quad r = R_1$$
$$\sigma_r = -P_н(t) \quad \text{при} \quad r = R_4 \qquad (2)$$

для кольцевого или стержневого твэла с осевой полостью,

$$\sigma_r = \sigma_\theta \quad \text{при} \quad r = 0$$
$$\sigma_r = -P_н(t) \quad \text{при} \quad r = R_4 \qquad (3)$$

для стержневого (сплошного) твэла. Здесь и в дальнейшем R_1, R_2, R_3, R_4 - радиусы, в порядке возрастания, внутренней и наружной оболочек твэла; для твэла с полостью $-R_1 = R_2$; $P_{вн}, P_н$ - давления теплоносителя на внутреннюю и наружную оболочки, для твэла с осевой полостью $P_{вн}$ - давление газов в полости.

I.2. Уравнение совместности деформаций

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \frac{\varepsilon_\theta - \varepsilon_r}{r} = 0. \qquad (4)$$

I.3. Физические зависимости между напряжениями и деформациями, которые запишем в виде /I,2/

$$\varepsilon_{rj}=\frac{1}{E}[\sigma_{rj}-\mu(\sigma_{\theta j}+\sigma_{zj})]+\alpha_T T+\varepsilon^{\Sigma}_{r_{j-1}}+\Delta\varepsilon^{\Sigma}_{rj},$$
$$\varepsilon_{\theta j}=\frac{1}{E}[\sigma_{\theta j}-\mu(\sigma_{zj}+\sigma_{rj})]+\alpha_T T+\varepsilon^{\Sigma}_{\theta j-1}+\Delta\varepsilon^{\Sigma}_{\theta j}, \quad (5)$$
$$\varepsilon_{zj}=\frac{1}{E}[\sigma_{zj}-\mu(\sigma_{rj}+\sigma_{\theta j})]+\alpha_T T+\varepsilon^{\Sigma}_{zj-1}+\Delta\varepsilon^{\Sigma}_{zj},$$

где

$$\varepsilon^{\Sigma}_{rj-1}=\varepsilon^{p}_{rj-1}+\varepsilon^{c}_{rj-1}+\varepsilon^{v}_{rj-1}, \quad (6)$$
$$\Delta\varepsilon^{\Sigma}_{rj}=\Delta\varepsilon^{p}_{rj}+\Delta\varepsilon^{c}_{rj}+\Delta\varepsilon^{v}_{rj}. \quad (7)$$

Соотношения, аналогичные (6), (7), справедливы также для величин $\varepsilon^{\Sigma}_{\theta j-1}, \varepsilon^{\Sigma}_{zj-1}$ и $\Delta\varepsilon^{\Sigma}_{\theta j}, \Delta\varepsilon^{\Sigma}_{zj}$. Здесь $\varepsilon^{p}, \varepsilon^{c}, \varepsilon^{v}$ – компоненты пластической, вязкой и "объемной", вызванной распуханием топлива или оболочки, деформаций; $\alpha_T T$ – температурная деформация.

Компоненты пластической, вязкой и "объемной" деформаций будем определять как сумму их приращений на отдельных этапах нагружения $\Delta t_j=t_j-t_{j-1}$. Эти приращения находятся из соответствующих физических соотношений.

I.4. Для случая пластической деформации согласно /3/ имеем

$$d\varepsilon^{p}_{r}=\frac{3}{2}\frac{\sigma_r-\sigma_0}{\sigma_i}d\text{æ}^{p},\ d\varepsilon^{p}_{\theta}=\frac{3}{2}\frac{\sigma_\theta-\sigma_0}{\sigma_i}d\text{æ}^{p},\ d\varepsilon^{p}_{z}=\frac{3}{2}\frac{\sigma_z-\sigma_0}{\sigma_i}d\text{æ}^{p}, \quad (8)$$

где

$$\sigma_0=\frac{1}{3}(\sigma_r+\sigma_\theta+\sigma_z), \quad (9)$$
$$\sigma_i=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_r-\sigma_\theta)^2+(\sigma_\theta-\sigma_z)^2+(\sigma_z-\sigma_r)^2}. \quad (10)$$

Кривая пластического деформирования представляется в виде

$$\sigma_s=\sigma_T+E_y(\text{æ}^{p}+\text{æ}_0)^{\alpha} \quad (11)$$

и приращение накопленной пластической деформации æ^{p} определяется следующим образом

$$d\text{æ}^{p}=0 \quad \text{при} \quad \sigma_{ij}\le\sigma_{sj},$$
$$d\text{æ}^{p}=\frac{1}{E}(\sigma_{ij}-\sigma_{sj}) \quad \text{при} \quad \sigma_{ij}>\sigma_{sj}. \quad (12)$$

I.5. Для определения деформаций ползучести используем зависимости /3/

$$\frac{d\varepsilon^{c}_{r}}{dt}=\frac{3}{2}\frac{\sigma_r-\sigma_0}{\sigma_i}\frac{d\text{æ}^{c}}{dt},\ \frac{d\varepsilon^{c}_{\theta}}{dt}=\frac{3}{2}\frac{\sigma_\theta-\sigma_0}{\sigma_i}\frac{d\text{æ}^{c}}{dt},\ \frac{d\varepsilon^{c}_{z}}{dt}=\frac{3}{2}\frac{\sigma_z-\sigma_0}{\sigma_i}\frac{d\text{æ}^{c}}{dt}, \quad (13)$$

где скорость накопленной деформации ползучести $\frac{d\varkappa^c}{dt}$ представим как сумму "тепловой" и "радиационной" составляющих процесса ползучести,

$$\frac{d\varkappa^c}{dt} = \frac{d\varkappa^c_T}{dt} + \frac{d\varkappa^c_\varphi}{dt} . \qquad (14)$$

По теории течения эти составляющие запишем в виде

$$\frac{d\varkappa^c_T}{dt} = B(T,t)\,\sigma_i^{m_T} \qquad (15)$$

- "тепловая" составляющая,

$$\frac{d\varkappa^c_\varphi}{dt} = A(T,t,\varphi_n)\left(\sigma_i + B_\varphi \sigma_i^{m_\varphi}\right) \qquad (16)$$

- "радиационная" составляющая скорости ползучести.

Здесь φ_n - плотность потока нейтронов с энергией $E>E_o$.

1.6. "Объемные" деформации определяем из соотношений

$$\frac{d\varepsilon^v_r}{dt} = \delta_r \frac{dS}{dt}, \quad \frac{d\varepsilon^v_\theta}{dt} = \delta_\theta \frac{dS}{dt}, \quad \frac{d\varepsilon^v_z}{dt} = \delta_z \frac{dS}{dt} , \qquad (17)$$

где S - функция распухания топлива (оболочки), $\delta_r, \delta_\theta, \delta_z$ - коэффициенты, характеризующие направленность процесса распухания.

Распухание топлива S определяется по модели "сферических газовых пор" /2/. Скорость распухания представим в виде

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1+S}{1+S_T}\cdot\frac{dS_T}{dt} + \frac{3}{2}\left(\frac{3}{2m^*}\right)^{m^*} B^*(T)\, J\, |J|^{m^*-1} , \qquad (18)$$

где $S_T = K_1(t)\,B_6(t)/1-\varepsilon$,

$$J = \frac{P_a - P_\ell - \frac{2\gamma}{a_o}\left(\frac{\varepsilon}{S+\varepsilon+\varepsilon S_T - S_T}\right)^{1/3}}{\left(\frac{1+S}{S+\varepsilon+\varepsilon S_T - S_T}\right)^{1/m^*} - 1} .$$

Здесь ε - пористость топлива, $B_6(t)$ - выгорание топлива. P_a - давление газов деления в порах -определяется как

$$P_a = \frac{0{,}09\, T B_6(t)\,\varphi}{S+\varepsilon - B_6(t)\cdot K_2(t)} \qquad (19)$$

где φ - доля газов деления, собирающихся в порах ,

$$P_\ell = -\frac{1}{3}\left(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z\right) . \qquad (20)$$

Согласно /2/, /4/ скорость распухания материала оболочки представим в виде

$$\frac{dS_\sigma}{dt} = \frac{dS_k(T,\Phi)}{dt} + F_\varphi^*\left(T,\varphi_n,t,\sigma,S_k^{1/3},S_\sigma^{2/3}\right) , \qquad (21)$$

где $dS_k(T,\Phi)/dt$ - скорость свободного распухания материала вследствие образования пор, зависящая от температуры и дозы облучения Φ ,

$f_\varphi^*(T,\varphi_n,t,\sigma,S_\kappa^{1/3},S_\sigma^{2/3})$ - скорость роста пор под действием гидростатического напряжения σ_0.

Конкретный вид зависимостей $dS_\kappa(T,\Phi)/dt$ и $f_\varphi^*(T,\varphi_n,t,\sigma,S_\kappa^{1/3},S_\sigma^{2/3})$ ввиду их громоздкости здесь не приводится, см. работы /2/, /4/.

1.7. Приведенные уравнения необходимо дополнить условием равновесия вдоль оси твэла

$$\int_{R_1}^{R_4} \sigma_z\, r\, dr = \frac{1}{2}(p_{вн} R_1^2 - p_н R_4^2) + \frac{P_z}{2\pi}\ . \qquad (22)$$

Для расчета тонкостенных оболочек можно принять, что ε_r и ε_θ не зависят от координат по радиусу. В этом случае уравнения (1)-(4) заменяются на условия равновесия

$$\int_{R_3}^{R_4} \sigma_\theta\, dr + \sigma_r^*(R_3)R_3 + p_н R_4 = 0\ , \qquad (23)$$
$$\int_{R_1}^{R_2} \sigma_\theta\, dr - \sigma_r^*(R_2)R_2 - p_{вн} R_1 = 0$$

и условия

$$\varepsilon_{\theta н} = \varepsilon_\theta^*(R_3)\ ,\ \varepsilon_{\theta вн} = \varepsilon_\theta^*(R_2)\ .$$

Индекс (*) показывает, что соответствующие деформации и напряжения относятся к топливному сердечнику.

2. Для реализации численного алгоритма преобразуем (5) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rj} &= a_j \sigma_{rj} - b_j(\sigma_{\theta j} + \sigma_{zj}) + \psi_{r\,j-1} + \delta_r S_j\ ,\\ \varepsilon_{\theta j} &= a_j \sigma_{\theta j} - b_j(\sigma_{zj} + \sigma_{rj}) + \psi_{\theta\, j-1} + \delta_\theta S_j\ ,\\ \varepsilon_{zj} &= a_j \sigma_{zj} - b_j(\sigma_{rj} + \sigma_{\theta j}) + \psi_{z\,j-1} + \delta_z S_j\ , \end{aligned} \qquad (24)$$

где были использованы следующие обозначения

$$\psi_{r\,j-1} = \psi_{r\,j-2} + \frac{\Delta t_{j-1}}{2}(2\sigma_{r\,j-1} - \sigma_{\theta\,j-1} - \sigma_{z\,j-1})\{\psi_{1\,j-1}(1 + B_\varphi \sigma_{i\,j-1}^{m_\varphi - 1}) + \psi_{2\,j-1}\sigma_{i\,j-1}^{m_T-1}\} + \Delta\varepsilon^p_{r\,j-1}\ , \qquad (25)$$

$$\psi_{r0} = \alpha_T T + \frac{\Delta t_0}{4}(2\sigma_{r0} - \sigma_{\theta 0} - \sigma_{z0})\{\psi_{10}(1 + B_\varphi \sigma_{i0}^{m_\varphi-1}) + \psi_{20}\sigma_{i0}^{m_T-1}\}. \qquad (26)$$

$\psi_{\theta\,j-1}, \psi_{z\,j-1}, \psi_{\theta 0}, \psi_{z0}$ - получаются циклической перестановкой индексов;

$$\begin{aligned} &\psi_{1j} = A(T, t_j, \varphi_n)\ ,\quad \psi_{2j} = B(T, t_j)\ ,\\ &a_j = \frac{1}{E} + \frac{\Delta t_j}{2}[\psi_{1j}(1 + B_\varphi \sigma_{ij}^{m_\varphi-1}) + \psi_{2j}\sigma_{ij}^{m_T-1}]\ ,\\ &b_j = \frac{\mu}{E} + \frac{\Delta t_j}{4}[\psi_{1j}(1 + B_\varphi \sigma_{ij}^{m_\varphi-1}) + \psi_{2j}\sigma_{ij}^{m_T-1}]\ . \end{aligned} \qquad (27)$$

Вводя обозначения

$$\Phi_{rj} = \mathcal{E}_{rj} - \Psi_{r\,j-1} - \delta_r S_j,$$
$$\Phi_{\theta j} = \mathcal{E}_{\theta j} - \Psi_{\theta\,j-1} - \delta_\theta S_j,$$
$$\Phi_{zj} = \mathcal{E}_{zj} - \Psi_{z\,j-1} - \delta_z S_j$$

и преобразуя (I0)

$$\sigma_{i_j} = \frac{1}{\sqrt{2}}\,\frac{\sqrt{(\Phi_{rj}-\Phi_{\theta j})^2+(\Phi_{\theta j}-\Phi_{zj})^2+(\Phi_{zj}-\Phi_{rj})^2}}{a_j+b_j} \tag{28}$$

получим систему уравнений для определения a_j+b_j с последующим вычислением коэффициентов a_j и b_j

$$a_j+b_j = \frac{1+\mu}{E} + \frac{3}{4}\Delta t_j \Psi_{1j} + \frac{3}{4}\Delta t_j B_\varphi \Psi_{1j}\left[\frac{\sqrt{(\Phi_{rj}-\Phi_{\theta j})^2+(\Phi_{\theta j}-\Phi_{zj})^2+(\Phi_{zj}-\Phi_{rj})^2}}{\sqrt{2}\,(a_j+b_j)}\right]^{m_\varphi-1} +$$
$$+\frac{3}{4}\Delta t_j \Psi_{2j}\left[\frac{\sqrt{(\Phi_{rj}-\Phi_{\theta j})^2+(\Phi_{\theta j}-\Phi_{zj})^2+(\Phi_{zj}-\Phi_{rj})^2}}{\sqrt{2}\,(a_j+b_j)}\right]^{m_T-1}. \tag{29}$$

Полученная система трансцендентных уравнений позволяет обойти сложности, связанные с решением систем нелинейных дифференциальных уравнений.

3. Систему уравнений (I)-(4), используя (24), приводим к следующему виду:

$$\frac{d}{dr} a_j \frac{d r\sigma_{rj}}{dr} - \frac{d b_j \sigma_{ri}}{dr} + c_j(1-\delta)\frac{d\sigma_{ri}}{dr} - c_j\delta\frac{\sigma_{ri}}{r} =$$
$$= \frac{d b_j \sigma_{zi}}{dr} - c_j\delta\frac{\sigma_{\theta i}}{r} - \frac{d}{dr}\left[\Psi_{\theta j-1} + \delta_\theta S_j\right], \tag{30}$$

$$\frac{d}{dr} a_j \sigma_{\theta j} - \frac{d b_j(\sigma_{rj}+\sigma_{zj})}{dr} + \frac{c_j(\sigma_{\theta j}-\sigma_{rj})}{r} = -\frac{d}{dr}\left(\Psi_{\theta j-1} + \delta_\theta S_j\right), \tag{31}$$

где δ - параметр регуляризации, который выбирается из решения модельной задачи таким образом, чтобы аналитическое решение дифференциального уравнения модельной задачи совпадало с аналитическим и численным решениями разностного уравнения, соответствующего этому дифференциальному уравнению.

Соответствующая разностная система имеет вид

$$\sigma_{rj\,k+2} - B^{(1)}_{j\,k+1}\sigma_{rj\,k+1} + C^{(1)}_{j\,k+1}\sigma_{rj\,k} = f^{(1)}_{j\,k+1}, \tag{32}$$

$$\sigma_{\theta j\,k+1} = \frac{C^{(2)}_{jk}}{B^{(2)}_{jk}}\sigma_{\theta jk} + \frac{f^{(2)}_{jk}}{B^{(2)}_{jk}} \tag{33}$$

Конечные уравнения для решения системы (32) методом прогонки /5/ напишем в следующем виде

$$\sigma_{r\,k+1} = X_{k+1}\,\sigma_{r\,k+2} + Y_{k+1}\,\sigma_{r_0} - Z_{k+1}\,, \tag{34}$$

$$X_{k+1} = \frac{1}{B^{(1)}_{k+1} - C^{(1)}_{k+1} X_k}\,,\quad Y_{k+1} = C^{(1)}_{k+1} X_{k+1} Y_k\,,\quad Z_{k+1} = X_{k+1}\left[C^{(1)}_{k+1} Z_k + f^{(1)}_{k+1}\right] \tag{35}$$

с начальными условиями:

$$X_0 = 0\,,\ Y_0 = 1\,,\ Z_0 = 0\,,\ \sigma_{rN} = \varphi_1\,,$$

которые соответствуют условию, что рассматривается топливный сердечник с полостью и внешней тонкостенной оболочкой, $r = R_1 = R_2$ $\sigma_{r_0} = -p_r$ (давление газа в полости), $r = R_3$ $\sigma_{rN} = \varphi_1$,

где

$$\varphi_1 = -\frac{1}{R_3}\left(\int_{R_3}^{R_4} \sigma_\theta\, dr + p_н R_4\right);$$

$$X_0 = 0,\ Y_0 = 1{,}0\ ,\ Z_0 = 0\ ,\ \sigma_{rN} = \varphi_1\,,$$

которые соответствуют условию, что рассматривается топливный сердечник с внутренней и наружной тонкостенными оболочками,

$$r = R_2\quad \sigma_{r_0} = \varphi_2\ ,\quad r = R_3\quad \sigma_{rN} = \varphi_1\,,$$

где

$$\varphi_2 = -\frac{1}{R_2}\left(\int_{R_1}^{R_2} \sigma_\theta\, dr + p_{вн} R_1\right);$$

$$X_0 = 1\ ,\ Y_0 = 0\ ,\ Z_0 = 0\ ,\ \sigma_{rN} = \varphi_1\,,$$

которые соответствуют условию, что рассматривается сплошной топливный сердечник с наружной тонкостенной оболочкой,

$$r = 0\quad \sigma_{r_0} = \sigma_{\theta_0}\ ,\quad r = R_3\quad \sigma_{rN} = \varphi_1\,.$$

Граничное условие для разностного уравнения (33) имеет вид:

$$r_0 = 0\qquad \sigma_{r_0} = \sigma_{\theta_0}$$

– для сплошного топливного сердечника

$$r_0 = R_2\,,\ \sigma_{\theta_0} = \frac{\left(1 + \frac{\Delta r_1}{2 r_{1/2}}\right)\sigma_{r_1} - \left(1 - \frac{\Delta r_1}{2 r_{1/2}}\right)\sigma_{r_0}}{\frac{\Delta r_1}{2 r_{1/2}}\left(1 + \frac{C_1^{(2)}}{B_1^{(2)}}\right)} - \frac{\frac{f_1^{(2)}}{B_1^{(2)}}}{1 + \frac{C_1^{(2)}}{B_1^{(2)}}}$$

– для кольцевого топливного сердечника.

4. Для вычисления радиальной и тангенциальной составляющих деформаций и осевого напряжения в топливном сердечнике используются уравнения (24), осевая деформация определяется из условия равенства нулю главного вектора осевых усилий. Функцию распухания топлива будем вычислять из её разложения в ряд Тейлора, ограничиваясь тремя членами ряда

$$S_{j+1} = S_j + \frac{dS}{dt_{j+1/2}} \Delta t_j + \frac{d^2S}{dt^2_{j+1/2}} \cdot \frac{\Delta t_j^2}{2} ,$$

где производные вычисляются с помощью исходного уравнения распухания.

Из рассмотренной разностной системы уравнений с помощью последовательных приближений вычисляются функции распухания, напряжения и деформации в топливном сердечнике и оболочках. Для улучшения сходимости последовательных приближений при решении уравнений методом прогонок использовался параметр регуляризации.

5. В качестве примера приведём некоторые результаты расчётов 3-х типов твэлов (стержневого со сплошным и полым топливным сердечником и кольцевого). Материал оболочки - нержавеющая сталь ($\alpha_T = 18 \cdot 10^{-6}$ $^1/$град), материал сердечника - металлический уран ($\alpha_T = 21 \cdot 10^{-6}$ $^1/$град).

Учитывается распухание топлива и давление теплоносителя. Распухание оболочек не учитывается. Для описания пластических деформаций оболочки используется диаграмма деформирования с линейным упрочнением. Сердечник - идеально упругий.

При выходе на мощность ($t \approx 0$) за счёт разницы температурных деформаций сердечник деформируется упруго, а оболочка испытывает упруго-пластическое нагружение.

На рис. I и 2 приведено распределение напряжений и деформаций ползучести по сечению сплошного сердечника стержневого твэла для разных моментов времени. Распределение напряжений σ_θ и σ_z ($\sigma_r \approx 0$) по толщине оболочки (не приводится) имеет линейный характер в соответствии с заданным законом изменения температуры. В течение первых нескольких часов работы происходит сильная релаксация напряжений как в сердечнике, так и в оболочке. Поэтому в таких случаях при оценках работоспособности твэлов с большим ресурсом повреждаемостью от кратковременного действия высоких начальных напряжений можно пренебречь. Напряжения в твэле снижаются до 2200 часов, после чего начинают возрастать. Это объясняется действием распухающего топлива, которое начиная с этого момента постоянно нагружает оболочку. Распределение распухания по сечению сердечника показано на рис.3. В первые часы работы распухание в центре сердечника отрицательно, так как величина гидростатического сжатия превосходит давление газов деления в порах топлива. Последующее снижение величины гидростатического сжатия и постепенный рост давления газов приводят к постепенному росту распухания, причём распухание в центре сердечника идёт быстрее вследствие более высокой температуры.

На рис.4 и 5 дано распределение напряжений, соответственно, для полого сердечника и сердечника кольцевого твэла. Твэл с полым сердечником нагружен изнутри давлением газа I00 ат. Распухание топлива учитывается и в этих случаях, но за указанный период времени не успело "проработать", как в I-м случае.

На рис.6 показано, как изменяются окружные напряжения в оболочке (для одной точки на внешней поверхности) в зависимости от времени. Видно, что для стержневого сплошного твэла напряжения снижаются (релаксируют) до 3000 часов, после чего под действием распухающего топлива начинают постепенно возрастать.

Разработанная программа расчета напряжений и деформаций позволяет уточнить границы применения упрощенных методов расчёта, используемых на практике для многочисленных инженерных расчетов твэлов различных реакторов.

Литература

I. Yalch J.P., McConnelee J.E., Plane strain creep and plastic deformation analysis of a composite tube, Nucl. Eng. and Design, vol. 5, No. 1, 1967.
2. Ю.И.Лихачев, В.Я.Пупко. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. Атомиздат, М., I975.
3. Н.Н.Малинин, Прикладная теория пластичности и ползучести. "Машиностроение", М., I968.
4. Boltax A. et al, Mixed-oxide fuel pin performance analysis using the OLYMPUS computer code, Proceedings of the conference "Fast reactor fuel element technology, New-Orleans, 1971.
5. С.К.Годунов, В.С.Рябенький, Введение в теорию разностных схем. ГИ ФМЛ, М., I962.

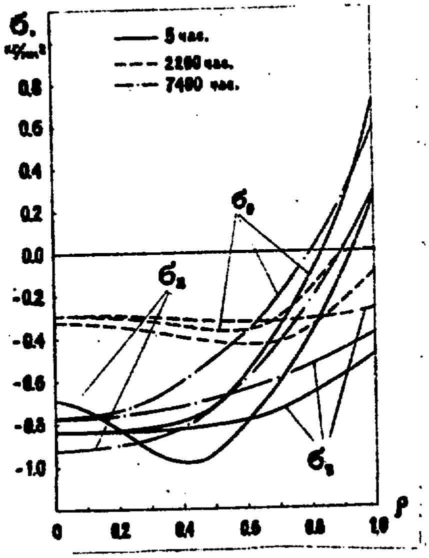

Рис. I.

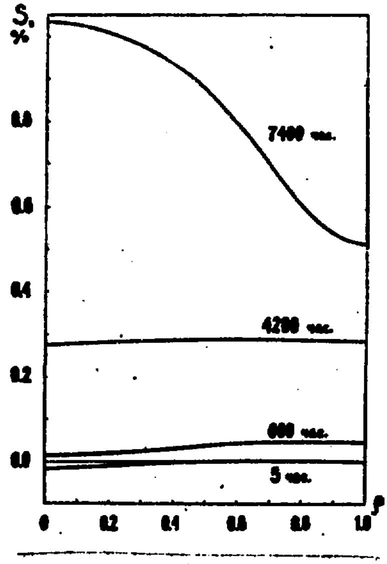

Рис. 3.

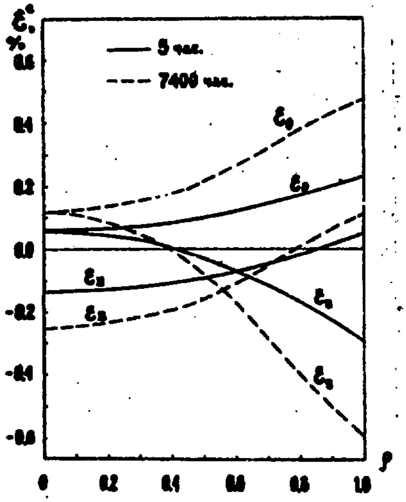

Рис. 2.

Распределение по сечению сплошного сердечника стержневого твэла:

Рис. I – напряжений,
Рис. 2 – деформаций ползучести,
Рис. 3 – распухания.

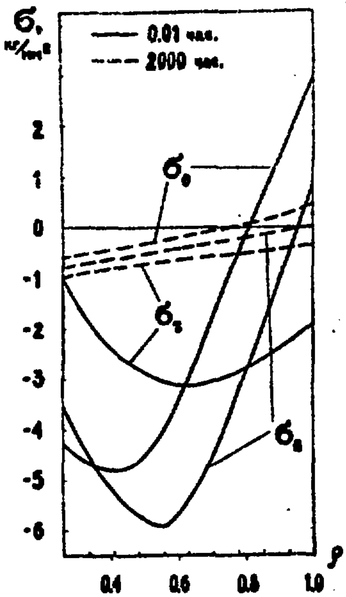

Рис.4. Распределение напряжений по сечению полого сердечника стержневого твэла.

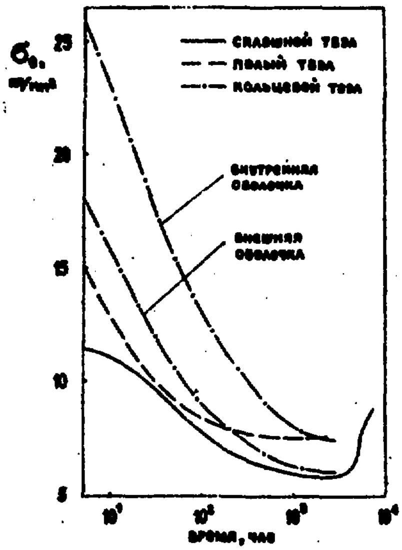

Рис. 6. Зависимость напряжений в оболочках твэлов от времени.

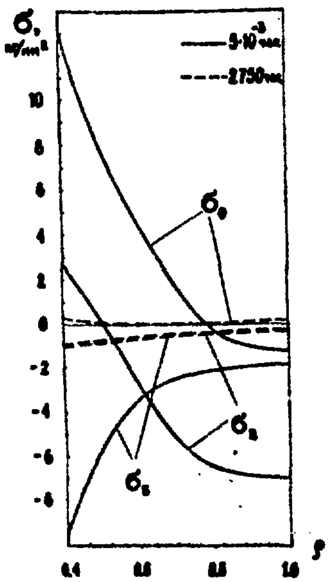

Рис. 5. Распределение напряжений по сечению сердечника кольцевого твэла.

ФЭИ-741 Т-07341 от 20/IУ-1977 г. Объем 0,5 уч.-изд.л. Тираж 122 экз.
Цена 5 коп. Заказ № 386

Отпечатано на ротапринте ФЭИ, июнь 1977 г.