

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



$\frac{СЗ48в+СЗ48г}{A-745}$ 3471/2-78

21/vii-78
3 - 11550

В.Л.Ломидзе, В.В.Мелихов

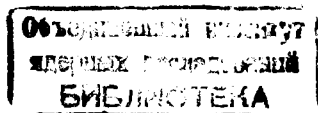
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТВЭЛА
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ИБР-2

1978

3 - 11550

В.Л.Ломидзе, В.В.Мелихов

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТВЭЛА
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ИБР-2



Ломидзе В.Л., Мелихов В.В.

3 - 11550

Термомеханический анализ твэла импульсного реактора ИБР-2

Рассматривается задача о нестационарном распределении температуры в твэле импульсного периодического реактора; рассчитываются напряжения в оболочке твэла с учетом факторов, не учитывавшихся ранее при анализе механических эффектов теплового удара (гидростатическое давление топлива на стенки оболочки, давление газообразных продуктов деления, зависимость теплофизических параметров от температуры, неоднородность температурного поля по радиусу твэла). Программа численного решения уравнений теплопроводности и термоупругости (в цилиндрической геометрии) учитывает влияние аксиальных инерциальных эффектов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Lomidze V.L., Melikhov V.V.

3 - 11550

Thermo-Mechanical Analysis of IBR-2 Pulse Reactor Fuel Pin

The problem of time dependent temperature distribution in fuel pin of a fast pulse reactor is considered. The thermo-mechanical stresses in fuel pin cladding are calculated with the addition of some aspects which have not been taken into consideration in earlier investigations of thermal shocks (the hydraulic pressure of the fuel itself and gas fission products, temperature dependence of thermal parameters, etc.). The procedure of numerical solution of heat transfer and thermo-elasticity equations includes axial effects of inertia.

The investigation has been performed at the Neutron Physics Laboratory, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемой работе рассматривается задача о нестационарном распределении температуры в тепловыделяющем элементе импульсного реактора и рассчитываются напряжения, возникающие в оболочках твэлов с учетом факторов, не рассмотренных ранее /пластические деформации, гидростатическое давление топлива и давление газообразных продуктов деления, зависимость теплофизических параметров от температуры, неоднородность распределения температуры по радиусу твэла/.

С этой целью создана программа численного решения уравнений теплопроводности и термоупругости в цилиндрической системе координат. Расчет напряжений проводится в "квазистатическом" приближении - без учета инерциальных эффектов, последние принимаются во внимание лишь при вычислении аксиальных напряжений.

1. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ТВЭЛЕ

Температурное поле $T(r, \phi, z, t)$ рассчитывалось для наиболее теплонапряженного твэла. Программа, по которой проводились расчеты, позволяет решать стационарное и нестационарное уравнение теплопроводности в цилиндрической трехмерной геометрии. В процессе вычисления температуры может выполняться квазистатический расчет напряжений в оболочке твэла с учетом пластических деформаций.

Температурное поле в твэле описывается уравнением теплопроводности

$$\operatorname{div}(\lambda \vec{\nabla} T) + q_v(r, \phi, z, t) = c_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad /1/$$

с граничным условием на внешней поверхности цилиндра ($r = R_2$):

$$\lambda(R_2, \phi, z) \frac{\partial T(R_2, \phi, z, t)}{\partial r} + a(\phi, z) [T(R_2, \phi, z, t) - \Theta(z, t)] = 0. \quad /2/$$

Температура теплоносителя $\Theta(z, t)$ связана с температурой внешней поверхности оболочки твэла $T(R_2, \phi, z, t)$ уравнением

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} + \frac{\rho F}{G} \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{R_2}{c_p G} \int_0^{2\pi} a [T(R_2, \phi, z, t) - \Theta(z, t)] d\phi, \quad /3/$$

где $G(t)$ - весовой расход теплоносителя для одного твэла, F - площадь поперечного сечения на один твэл теплоносителя.

В стационарной задаче подогрев теплоносителя вычисляется с помощью соотношения

$$c_p G_0 \frac{d\Theta}{dz} = \int_0^R \int_0^{2\pi} q_v r dr d\phi, \quad \theta(0) = \theta_{\text{вх}}. \quad /4/$$

Уравнение теплопроводности преобразуется в систему уравнений, записанных в конечно-разностной форме. Система решается итерационным методом при соблюдении условия теплового баланса в узловых точках.

В стационарной задаче процедура итераций выполняется по методу Либмана^{/1/}:

$$T_j^{(n+1)} = T_j^{(n)} (1 - \beta) + \beta \frac{\sum_{i=1}^m K_i T_i + Q_j}{\sum_{i=1}^m K_i}. \quad /5/$$

Здесь β - коэффициент, ускоряющий сходимость; $T_j^{(n)}$ - температура j -й узловой точки после n -й итерации; T_i - температура одной из M точек, являющихся соседни-

ми по отношению к точке j ; $K_i = \frac{F_i \lambda_i}{X_i}$, λ_i - коэф-

фициент теплопроводности между точками i и j ; F_i - площадь части поверхности /элементарного объема/, окружающей j -ю узловую точку, в направлении i -й соседней точки; X_i - расстояние между точками i и j ; $Q_j = q_{vj} V_j$ - мощность тепловых источников в элементарном объеме V_j .

В некоторых узловых точках метод Либмана может быть расходящимся. В этом случае в итерационном процессе используется δ^2 -процесс Эйткина, который дает осцилляционную сходимость^{/2/}.

В нестационарной задаче формула для вычисления температуры имеет вид

$$T_j(t + \Delta t) = T_j(t) + \frac{\Delta t}{c_j} \left\{ \sum_{i=1}^m K_i [T_i(t) - T_j(t)] + Q_j(t) \right\}, \quad /6/$$

где $\Delta t \leq \left[\frac{c_j}{\sum K_i} \right]_{\min}$ - элементарный шаг во времени;

$c_j = c_{vj} \cdot v_j$ - теплоемкость элементарного объема v_j .

Зависимость удельной теплоемкости топлива от температуры использовалась в форме

$$c_{vj} = A_1 + A_2 T_j + A_3 / T_j^2. \quad /7/$$

Предполагалось, что в течение кампании реактора между топливом и оболочкой сохраняется контактное сопротивление, равное $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$. Расчеты проводились для импульсного реактора, работающего в режиме 5 с^{-1} на уровне средней мощности 4 МВт . По высоте $H = 0,444 \text{ м}$ твэл был разбит на 12 слоев. За нулевую отметку принималась нижняя часть столбика таблеток. Ниже приведены исходные данные для топлива, оболочки и теплоносителя.

1. Топливо /двуокись плутония/. Диаметр таблетки $2R_0 = 7,42 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 1,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, удельная теплоемкость^{/3/}

$$c_v = 2,6906 \cdot 10^6 + 5,83 \cdot 10^2 \cdot T - 3,839 \cdot 10^{10} / T^2.$$

2. Оболочка. Внешний диаметр $2R_2 = 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, толщина $\delta = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, коэффициент теплопроводности

$\lambda = 20 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, удельная теплоемкость $c_v = 4,44 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3\text{К}$.

3. Теплоноситель /натрий/. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 131,4 \text{ кВт/м}^2\text{К}$, теплоемкость $c_p = 1,345 \text{ кДж/м}^3\text{К}$, расход $G_0 = 5,756 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$, плотность $\rho = 838 \text{ кг/м}^3$, поперечное сечение $F = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Результаты расчета нестационарного распределения температуры в твэле для сечения с координатой $z = 0,204 \text{ м}$ представлены на рис. 1-4. Для этого слоя объемное тепловыделение в топливе равно $6,38 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3$ в среднем по высоте твэла $\bar{q}_v = 5,05 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3$.

Увеличение подогрева топлива в направлении от центра к периферии твэла /рис. 2/ объясняется зависимостью удельной теплоемкости топлива от температуры.

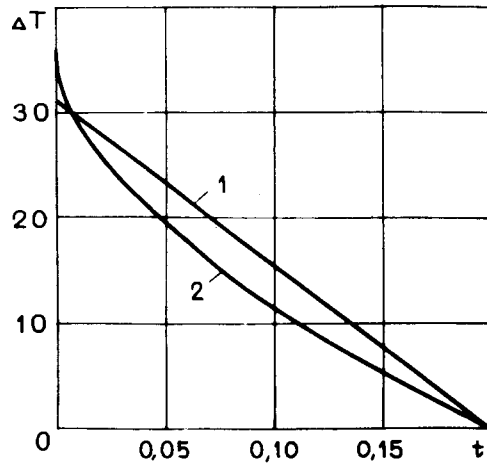


Рис. 1. Зависимость температуры топлива $\Delta T = T - T_0$ от времени/с/ в промежутке между двумя соседними импульсами мощности: 1 - на оси твэла / $T_0 = 1950^\circ\text{C}$ /; 2 - на поверхности топливного стержня / $T_0 = 609^\circ\text{C}$ /.

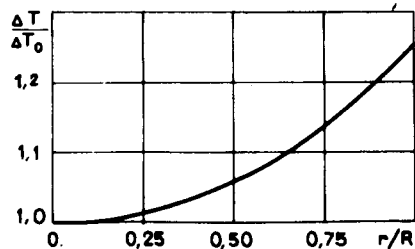


Рис. 2. Распределение подогрева топлива за импульс мощности по сечению стержня / $\Delta T_0 = 31^\circ\text{C}$, $R = 3,71 \text{ мм}$ /.

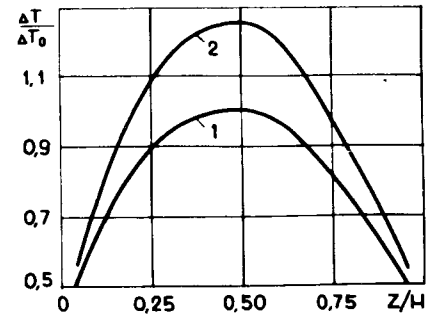


Рис. 3. Распределение подогрева топлива за импульс в осевом направлении / $\Delta T_0 = 31^\circ\text{C}$, $H = 0,444 \text{ м}$ /.

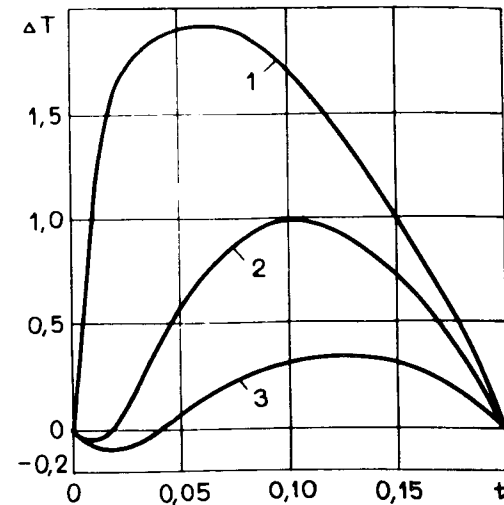


Рис. 4. Подогрев $\Delta T = T - T_0$ внутренней /1, $T_0 = 391^\circ\text{C}$ / и внешней /2, $T_0 = 367^\circ\text{C}$ / поверхностей оболочки и подогрев теплоносителя на выходе из активной зоны /3, $T_0 = 405^\circ\text{C}$ / как функции времени.

Средние по радиусу и по всему объему стержня подогревы топлива за импульс равны $\Delta T_R = 34,7^\circ\text{C}$ и $\Delta T_V = 27,5^\circ\text{C}$. Изменение перепада температуры стенок оболочки твэла достигает максимального значения $0,8^\circ\text{C}$ спустя $0,025 \text{ с}$ после появления импульса мощности /рис. 4/.

2. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБОЛОЧКЕ ТВЭЛА

В этом разделе анализируются напряжения, возникающие в оболочке твэла от следующих факторов: градиента

температуры, гидростатического давления топлива, теплового удара в топливе, а также быстрого подогрева оболочки за счет тепловыделения от γ -квантов, возникающих в момент появления импульса мощности.

2.1. Квазистатический расчет напряжений в оболочке твэла

Напряжения и деформации вычисляются в зависимости от выгорания топлива, так как в процессе работы реактора, начиная с момента появления импульса мощности, из-за выделения газообразных продуктов деления изменяются граничные условия на внутренней поверхности оболочки. Кроме того, рассчитываются изменения напряжений во времени между соседними импульсами мощности. Предполагается, что оболочка радиально-симметрична, изотропна и находится в плоскодеформированном состоянии; полная деформация состоит из трех составляющих: упругой, термической и пластической деформаций, т.е.

$$\epsilon_r = [\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)]/E + \alpha \Delta T + \epsilon_{pr}, \quad /8a/$$

$$\epsilon_\theta = [\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z)]/E + \alpha \Delta T + \epsilon_{p\theta}, \quad /8б/$$

$$\epsilon_z = [\sigma_z - \mu(\sigma_\theta + \sigma_r)]/E + \alpha \Delta T + \epsilon_{pz}. \quad /8в/$$

Здесь и далее обозначения общепринятые, кроме особо указанных.

Следующее допущение основано на том, что материал несжимаем в пластической области:

$$\epsilon_{pr} + \epsilon_{p\theta} + \epsilon_{pz} = 0. \quad /9/$$

Напряженное и деформированное состояния оболочки твэла описываются уравнениями равновесия:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \quad \frac{d\sigma_z}{dz} = 0; \quad /10/$$

уравнениями совместности деформаций:

$$\frac{d\epsilon_\theta}{dr} + \frac{\epsilon_\theta - \epsilon_r}{r} = 0, \quad \frac{d\epsilon_z}{dz} = 0, \quad /11/$$

с граничными условиями на внутренней и внешней поверхности оболочки:

$$\sigma_r = -P_g \quad \text{при} \quad r = R_1; \quad \sigma_r = -P_T \quad \text{при} \quad r = R_2 \quad /12/$$

и условием равновесия:

$$\int_{R_1}^{R_2} \sigma_z r dr = \frac{1}{2}(R_1^2 P_g - R_2^2 P_T) + \frac{1}{2}(R_2^2 - R_1^2) \sigma_m^*. \quad /13/$$

В этих формулах P_g - гидростатическое давление топлива на оболочку, P_T - внешнее давление, σ_m^* - продольные напряжения, обусловленные воздействием топлива на оболочку /например, при тепловом ударе, см. /32//. Учитывая /13/, продольную деформацию при плоскодеформированном состоянии можно представить в виде

$$\epsilon_z = [(R_1^2 P_g - R_2^2 P_T) + (R_2^2 - R_1^2) \sigma_m^* - 2 \int_{R_1}^{R_2} \Gamma_z r dr] / E (R_2^2 - R_1^2), \quad /14/$$

где

$$\Gamma_z = \mu(\sigma_\theta + \sigma_r) - E(\alpha \Delta T + \epsilon_{pz}). \quad /15/$$

Если ввести обозначения

$$e = (\epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z - 3\epsilon_R) / 3, \quad /16/$$

$$g = (\epsilon_r - \epsilon_\theta + \epsilon_z - 3\epsilon_R) / 3, \quad /17/$$

то решение системы /10,11/ запишется следующим образом:

$$e = \frac{1-2\mu}{3(1-\mu)} \left[\epsilon_{pr} - 2\epsilon_R + \int_{R_1}^r \frac{\epsilon_{pr} - \epsilon_{p\theta}}{r} dr \right] + \frac{1-2\mu}{3} \epsilon_z + B_1, \quad /18/$$

$$g = -\frac{2(1+\mu)}{3(1-\mu)} \cdot \frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \epsilon_R r dr + \frac{1-2\mu}{3(1-\mu)} [\epsilon_{pr} - 2\epsilon_R - \frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r (\epsilon_{pr} + \epsilon_{p\theta}) r dr] + \frac{\epsilon_z}{3} + B_2 / r^2. \quad /19/$$

Здесь

$$B_1 = \frac{2(1-\mu)(1+\mu)}{3E(R_2^2 - R_1^2)} [R_1^2 P_g - R_2^2 (P_T + G)], \quad /20/$$

$$B_2 = \frac{2(1+\mu)R_1^2 R_2^2}{3E(R_2^2 - R_1^2)} [P_T - P_g + G], \quad /21/$$

$$G = \frac{E}{1-\mu} \left[\frac{1}{2(1+\mu)} \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{r} (\epsilon_{pr} - \epsilon_{p\theta}) dr - \frac{1}{R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \epsilon_R r dr - \frac{1-2\mu}{2(1+\mu)} \frac{1}{R_2^2} \int_{R_1}^{R_2} (\epsilon_{pr} + \epsilon_{p\theta}) r dr \right]. \quad /22/$$

Компоненты напряжений и деформаций можно записать в виде

$$\sigma_r = \frac{3Ee}{2(1+\mu)(1-2\mu)} + \frac{3Eg}{2(1+\mu)} + \frac{E}{1+\mu} (2\epsilon_R - \epsilon_{pr} - \epsilon_z), \quad /23a/$$

$$\sigma_\theta = \frac{3Ee}{2(1+\mu)(1-2\mu)} - \frac{3Eg}{2(1+\mu)} - \frac{E}{1+\mu} (\epsilon_R + \epsilon_{p\theta}), \quad /23б/$$

$$\sigma_z = \frac{3\mu Ee}{2(1+\mu)(1-2\mu)} - \frac{E}{1+\mu} (\epsilon_R + \epsilon_{pz} - \epsilon_z), \quad /23в/$$

$$\epsilon_r = 3(e+g+2\epsilon_R)/2 - \epsilon_z, \quad /24a/$$

$$\epsilon_\theta = 3(e-g)/2. \quad /24б/$$

Эквивалентные напряжения и пластические деформации вычисляются по формулам

$$\sigma_e = [3(S_r^2 + S_\theta^2 + S_z^2)/2]^{1/2}, \quad /25/$$

$$\epsilon_{pe} = [2(\epsilon_{pr}^2 + \epsilon_{p\theta}^2 + \epsilon_{pz}^2)/3]^{1/2}, \quad /26/$$

где S_r , S_θ и S_z - девиаторы напряжений.

В /18,19/ остаются неопределенными пластические деформации оболочки. Метод, по которому проводятся итерационные вычисления в программе, включает следующие этапы:

- 1 - задаются пластические деформации ϵ_{pr} , $\epsilon_{p\theta}$, ϵ_{pz} ;
- 2 - вычисляются значения e и g ;
- 3 - рассчитываются девиаторы деформаций e_r , e_θ , e_z и модифицированные эквивалентные деформации

$$e_{te} = [2(e_r^2 + e_\theta^2 + e_z^2)/3]^{1/2}; \quad /27/$$

- 4 - σ_e и ϵ_{pe} вычисляются из уравнений:

$$e_{te} = \epsilon_{pe} + 2(1+\mu)\sigma_e / 3E, \quad /28/$$

$$f(\sigma_e, T) = \epsilon_{pe} + \sigma_e / E, \quad /29/$$

где полная эквивалентная деформация $f(\sigma_e, T)$, как функция эквивалентных напряжений σ_e и температуры T , считается известной из опыта;

5 - рассчитываются новые пластические деформации по формулам

$$\epsilon_{pr} = \epsilon_{pe} e_r / e_{te}; \quad \epsilon_{p\theta} = \epsilon_{pe} e_\theta / e_{te}; \quad \epsilon_{pz} = \epsilon_{pe} e_z / e_{te}. \quad /30/$$

Шаги 2-5 повторяются до тех пор, пока не будет достигнута желаемая точность.

При расчетах использовались следующие данные для материала оболочки^{4/}: коэффициент линейного расширения $\alpha = 1,926 \cdot 10^{-5} 1/K$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; модуль упругости $E = 1,687 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2$; предел текучести $\sigma_T = 28,545 - 1,255 T \text{ (кг/мм}^2)$; полная эквивалентная деформация

$$f(\sigma_e, T) = \sigma_e / E + k(\sigma_e / E)^n \quad /31/$$

где

$$k = \frac{3}{7} (E / \sigma_T)^{n-1}, \quad n = 5,5 + 7,11 \cdot 10^{-20} T^{7,03}, \quad ([T] = ^\circ\text{C}).$$

Результаты расчета представлены в таблице и на рис. 5, 6.

Таблица 1

Гидростатическое давление топлива и напряжения в оболочке твэла в зависимости от степени выгорания без учета теплового удара в топливе /внешнее давление $P_T = 2,4 \text{ атм/}$

в. %	0	0,02	0,42	1,75	2,50	2,83	3,20	3,50	4,0	5,0
$P_T, \text{ атм}$	5	45	95	145	190	245	270	280	290	300
На внутренней поверхности оболочки										
$\sigma_r, \text{ кг/мм}^2$	5,8	3,4	4,2	8,0	12,1	17,4	19,8	20,8	21,7	22,6
$\sigma_\theta, \text{ кг/мм}^2$	-5,8	-2,2	2,4	7,1	11,6	17,4	20,0	21,8	22,0	23,0
$\sigma_z, \text{ кг/мм}^2$	-5,8	-4,3	-2,3	-0,2	1,8	4,5	5,9	6,4	6,9	7,4
На внешней поверхности оболочки										
$\sigma_r, \text{ кг/мм}^2$	5,4	8,3	11,5	14,7	17,4	20,6	22,2	22,8	23,4	24,0
$\sigma_\theta, \text{ кг/мм}^2$	5,4	9,0	12,9	16,7	19,8	23,6	25,4	26,1	26,8	27,5
$\sigma_z, \text{ кг/мм}^2$	5,4	7,2	9,2	11,1	12,6	14,4	15,1	15,4	15,7	16,0

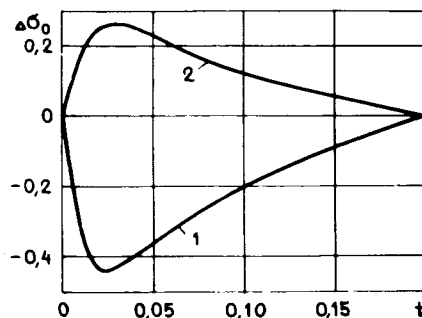


Рис. 5. Изменение тангенциальных напряжений / $[\Delta\sigma_0] = \text{кг/мм}^2$ / во времени между соседними импульсами мощности на внутренней /1/ и внешней /2/ поверхностях оболочки без учета теплового удара в топливе.

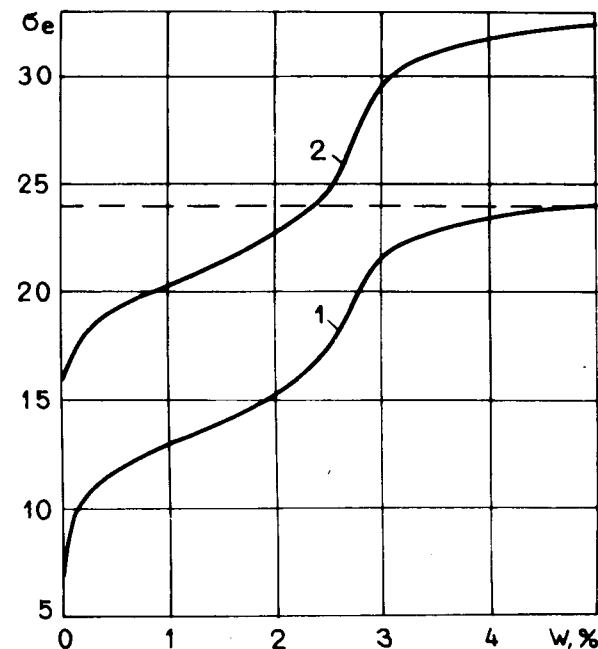


Рис. 6. Эквивалентные напряжения на внешней поверхности оболочки твэла в зависимости от степени выгорания топлива: 1 - без учета, 2 - с учетом теплового удара в топливе.

Из рис. 6 /кривая 1/ видно, что без учета теплового удара в топливе оболочка будет находиться в упругой области вплоть до 5%-ного выгорания.

2.2. Инерциальные напряжения, обусловленные тепловым ударом в топливе и быстрым нагревом за счет γ -излучения

Инерциальные эффекты имеет смысл учитывать лишь для продольных напряжений, поскольку только в осевом направлении период колебаний твэла сравним с длительностью нейтронной вспышки. Этот эффект имеет место при условии, что топливные таблетки соприкасаются друг с другом, образуя "полуупругий" стержень. В этом случае в первые моменты времени после вспышки мощности топливо оказывается сжатым. Релаксация напряжений сжатия приводит к механическому удару топлива по доньшку оболочки. В оболочке возникает бегущая вверх волна напряжений /растяжения/.

В работе /5/ получена следующая зависимость амплитуды напряжения в оболочке от среднего по объему стержня подогрева топлива за импульс

$$\sigma_m^* = \frac{E a_T \Delta T_V}{c / c_T (1 + \gamma)} \begin{cases} \delta_a + \delta_0 \frac{\sin \pi y / 2}{\pi y / 2}, & 0 \leq y \leq 1, \\ 1/y, & y > 1. \end{cases} \quad /32/$$

Здесь δ_a и δ_0 - компоненты аксиального коэффициента неравномерности тепловыделения; $\gamma = E S c_T / E_T S_T c$ - жесткость оболочки, E_T , S_T , c_T (E , S , c) - модуль упругости, сечение, скорость звука для топлива /оболочки/; $y = 1,15 \cdot c_T \Theta_{1/2} / H$, $\Theta_{1/2}$ - полуширина импульса.

Подставляя численные значения параметров оболочки, топлива твэла ИБР-2 ($a_T = 1,5 \cdot 10^{-5} 1/K$, $E_T = 0,945 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2$, $c_T = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $c = 4,8 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $\Theta_{1/2} = 94 \text{ мкс}$, $\delta_0 = 0,754$, $\delta_a = 0,519$), получим

$$\sigma_m^* = 0,137 \cdot \Delta T_V \text{ (кг/мм}^2\text{)}. \quad /33/$$

Таким образом, при $\Delta T_V = 27,5^\circ \text{C}$ получаем $\sigma_m^* = 3,75 \text{ кг/мм}^2$.

Частота продольных колебаний оболочки оценивается в $3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. В результате диссипации энергии колебаний амплитуда напряжений будет уменьшаться во времени. По предварительным оценкам, колебания затухают уже к очередному импульсу мощности /даже при частоте 50 с^{-1} /.

Выполненная оценка динамических напряжений может быть введена в уравнение /13/.

Из-за поглощения γ -квантов, появляющихся во время импульса мощности, в оболочке твэла присутствуют "мгновенные" источники тепла с плотностью тепловыделения $q_V = 2,2 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3$. Подогрев оболочки, обусловленный выделением такого количества энергии, равен $\Delta T_V = 0,5^\circ \text{C}$. Инерциальные напряжения, которые при этом возникают, можно оценить по формуле $\sigma_z = E a \Delta T_V / 2 (1 - \mu) / 0,27 \text{ кг/мм}^2$. Как видно, они незначительны и не могут оказать существенного влияния на состояние оболочки твэла.

2.3. Тангенциальные напряжения в оболочке твэла, обусловленные радиальным расширением топлива во время импульса мощности

Во время импульса мощности топливо распухает и оказывается прижатым к оболочке. Таблетки топлива, подогревающиеся в это время, стремятся расшириться и оказывают дополнительное переменное давление на оболочку. Напряжения, обусловленные импульсным давлением топлива на оболочку, можно оценить, решив плоскую задачу о напряжениях в бесконечном цилиндре, свойства которого скачкообразно изменяются в радиальном направлении. Поскольку толщина оболочки мала, то инерциальным эффектом можно пренебречь. Решение этой задачи для радиальных (σ_r) и тангенциальных (σ_θ) напряжений имеет вид

$$\sigma_r = (R_2^{-2} - r^{-2}) E C(t) / (1 + \mu), \quad /34a/$$

$$\sigma_{\theta} = (R_2^{-2} + r^{-2}) E C(t) / (1 + \mu), \quad /346/$$

где

$$C(t) = \frac{(1 + \mu_T) \alpha_T \Delta T_R(t)}{2(1 - \mu) R_2^{-2} + [1 + (1 - 2\mu)(1 - \mu_T) E / E_T (1 - \mu)] (R_1^{-2} - R_2^{-2})}. \quad /35/$$

Подставляя численные значения параметров оболочки и топлива, а также значение вычисленного в разделе 1 среднего по радиусу подогрева топлива за импульс $\Delta T_R = 34,7^\circ C$, имеем для $r = R_1$:

$$\sigma_r = -0,034 \cdot \Delta T_R = -1,6 \text{ кг/мм}^2;$$

$$\sigma_{\theta} = 0,312 \cdot \Delta T_R = 10,8 \text{ кг/мм}^2.$$

Из рис. 6 /кривая 2/ следует, что с учетом тангенциальных нестационарных напряжений в оболочке твэла появятся остаточные деформации при выгорании топлива более 2,4%.

ВЫВОДЫ

Созданная программа численного расчета нестационарных температурных полей и напряжений в твэлах импульсного реактора позволила установить следующее:

1. Пульсации средней температуры теплоносителя на выходе из активной зоны ИБР-2 при работе реактора на средней мощности 4 МВт с частотой импульсов 5 с^{-1} незначительны и составляют $0,2^\circ C$.

2. Пульсации напряжений в оболочке от изменения перепада температуры между соседними импульсами также малы - $0,44 \text{ кг/мм}^2$.

3. Основной вклад в пульсации напряжений в оболочке вносит тепловой удар в топливе. При нормальной

работе реактора ИБР-2 на частоте 5 с^{-1} амплитуда осевых инерциальных напряжений достигает $3,75 \text{ кг/мм}^2$, а тангенциальных - $10,8 \text{ кг/мм}^2$.

4. Пластические деформации оболочки твэла появятся при выгорании топлива более 2,4% при работе на мощности 4 МВт с частотой следования импульсов 5 с^{-1} и выгорании более 4% при частоте 10 с^{-1} .

ЛИТЕРАТУРА

1. Frankel S.P. *Mathematical Tables and Other A. in Computation*, 1950, 4, p.65, Washington.
2. Householder A.S. *Principles of Numerical Analysis*, 1953, p.126, New York.
3. Плутоний. *Справочник*, т.2, Атомиздат, М., 1973.
4. Cheng C.K., Ma B.M. *Nucl.Sci. Eng.*, 1972, 48, 2, p.139.
5. Ломидзе В.Л. ОИЯИ, P11-6621, Дубна, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 мая 1978 года.