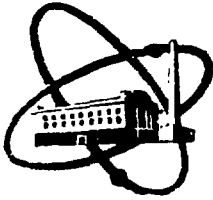


7102501

ФЭИ -- 1978.

ФЭИ-1978



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Л. Н. СЕРГЕЕВА

**Методика расчета температурных полей  
в тепловыделяющих сборках  
канальных реакторов  
при авариях с потерей теплоносителя**

Обнинск — 1989

УДК 621.039.546

**Л. Н. Сергеева.**

**Методика расчета температурных полей в тепловыделяющих сборках канальных реакторов при авариях с потерей теплоносителя.**

ФЭИ-1978. Обнинск, 1989. — 12 с.

В работе построена математическая модель и реализующий модель численный алгоритм задачи динамики разогрева тепловыделяющей сборки канального реактора при авариях с потерей теплоносителя.

В основе модели лежит система нестационарных уравнений теплопроводности, уравнения термоупругости и система замыкающих коэффициентов радиационного, контактного и конвективного теплообмена.

Задача рассматривается в глобально одномерной постановке.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проявляется значительный интерес к моделированию на ЭВМ переходных и аварийных режимов ядерных энергетических установок.

Наличие банка быстродействующих программ такого характера является основой для прогнозирования параметров аппаратов в данных режимах, с одной стороны, и базой для разработки тренажеров, с другой.

Значительная часть моделей основана на использовании физических механизмов того или иного комплекса явлений, возникающих при аварийных процессах.

С математической точки зрения подобные модели представляются в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных: теплопроводности, гидродинамики и т.п. и сложной системой замыкающих коэффициентов.

Размерность задачи в данном случае является одним из ограничивающих факторов, препятствующим до определенной степени реализации ее на современных ЭВМ.

Вторая сложность состоит в том, что определенную часть замыкающих коэффициентов приходится определять экспериментальным путем.

В данной работе рассмотрена математическая модель динамики разогрева тепловыделяющей сборки канального реактора при авариях с полной потерей теплоносителя. Модель позволяет получить мгновенные распределения температурных полей, деформаций и напряжений для всех основных конструктивных элементов тепловыделяющих сборок и графитового замедлителя.

Модель учитывает эффекты радиационного межत्वельного теплообмена при авариях с потерей теплоносителя, наличие сложного контактного и радиационного теплообмена между топливом и оболочкой.

Задача рассматривается в глобально - одномерной постановке.

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $t$  - температура,  $^{\circ}\text{C}$  ;
- $T$  - абсолютная температура,  $^{\circ}\text{K}$  ;
- $q$  - тепловой поток,  $\text{Вт}/\text{м}^2$  ;
- $a$  - коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{сек}$  ;
- $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$  ;
- $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$  ;
- $\sigma$  - коэффициент Стефана-Больцмана ,  $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{K}^4$  ;
- $E$  - модуль Юнга,  $\text{МПа}$  ;
- $\mu$  - коэффициент Пуассона ;
- $\alpha_L$  - коэффициент линейного расширения,  $1/^{\circ}\text{C}$  ;
- $r$  - радиус,  $\text{м}$  ;
- $\tau$  - время,  $\text{сек}$  .

## I. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На рис. I представлен разрез ячейки ТВС, включающей в себя: ряд твэл, центральную трубу, канальную трубу, графитовый замедлитель. Для каждого из перечисленных конструктивных элементов в данном сечении осесимметричное нестационарное поле температур описывается одномерным уравнением теплопроводности в местной полярной системе координат, связанной с осью симметрии элемента:

$$\frac{1}{a_i} \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left( r_i \frac{\partial t_i}{\partial r_i} \right) + \frac{q_{vi}(\tau)}{\lambda_i} \quad (I)$$

$$r_{i \min} < r_i < r_{i \max}$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

Здесь:  $M$  - полное количество элементов ТВС, включая замедлитель. Подробный список обозначений для ур-я (I) представлен в таблице I. Несимметричная форма блока-замедлителя описывается цилиндрической, как показано на рис. I.

Уравнения (I) следует дополнить системой замыкающих коэффициентов - граничных и начальных условий, среди которых выделяются следующие группы:

- а) условия на границах раздела топливо-оболочка твэл (твэльные характеристики);
- б) условия на границе раздела: оболочка ТВС - замедлитель;
- в) естественные граничные условия (условия симметрии);
- г) условия межтвэльного теплообмена;
- д) начальные условия.

Определение перечисленных условий в совокупности с (I) определяет математическую модель рассматриваемого процесса.

### I.1. Условия на границе раздела топливо-оболочка твэл.

В данном случае реализуются граничные условия III рода имеющие вид: (см. рис. 2):

$$-\lambda_T \frac{\partial t_T}{\partial z} \Big|_{z=z_2} = -\lambda_{CT} \frac{\partial t_{CT}}{\partial z} \Big|_{z=z_3} = \alpha_1 (t_T \Big|_{z=z_2} - t_{CT} \Big|_{z=z_3}), \quad (2)$$

Таблица I. Список обозначений элементов ТВС

Элемент "L"	I	2		M-2		M-I	M
		топливо	газ	топливо	газ		
$Z_{i min}$	центр. труба	$Z_1$				оболочка ТВС	графит
		$Z_2$					
$Z_{i max}$							
$q_{vi}$	0	$q_{v(\tau)}$		0	0		$q_{VM}(\tau)$
$Z_i, a_i, \lambda_i, E_i, \alpha E_i$	$Z_{cm}, \dots$	$Z_1, \dots$		$Z_{cm}, \dots$		$Z_{cm}, \dots$	$Z_{cp}, \dots$

где: эффективный коэффициент теплоотдачи -  $d_1$  определяется, в общем случае следующими факторами:

- а) теплопроводностью газового зазора,
- б) радиационной составляющей,
- в) контактной составляющей

При данном комплексном подходе в соответствии с [1]:

$$d_1 = d_T + d_{раг} + d_k \quad (3)$$

где:

$$d_T = \lambda_2 / \delta_{эфф} \quad (4)$$

$$d_{раг} = \frac{\epsilon (T_T^4 / r_2 - T_{сг}^4 / r_3)}{t_T / r_2 - t_{сг} / r_3} \quad (5)$$

$$d_k = f(P_k) \quad (6)$$

- эмпирическая связь контактной составляющей с контактным усилием. Входящие в (4), (6) значения эффективной величины зазора ( $\delta_{эфф}$ ) и контактного усилия ( $P_k$ ) определяются решением сопряженной термомеханической задачи деформирования твела имеющем в данном случае вид:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{эфф} &= \begin{cases} \delta_{эфф_0} + \Delta U & \text{при } \Delta U \geq 0 \\ \delta_{эфф_0} & \text{при } \Delta U < 0 \end{cases} \\ P_k &= \begin{cases} 0 & \text{при } \Delta U \geq 0 \\ -c \cdot \Delta U & \text{при } \Delta U < 0 \end{cases} \\ \Delta U &= \Delta U_0 + r_3 \cdot d_{Есг} \cdot \bar{t}_{сг} - r_2 d_{ЕТ} \cdot \bar{t}_T \\ \bar{t}_{сг} &= \frac{2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} t(r) r dr \\ \bar{t}_T &= \frac{2}{r_4^2 - r_3^2} \int_{r_3}^{r_4} t(r) r dr \end{aligned} \right\} (7)$$

В (7) приняты следующие обозначения:

$\delta_{\text{эфф}}$  - шероховатость поверхностей,

$\Delta U$  - разность термических перемещений поверхностей раздела (топлива и оболочки),

$\Delta U_0$  - начальная величина зазора,

$C$  - механическая константа связи величин  $R_k$  и  $\Delta U$  [11]

В (7) рассматриваются упругие деформации. Соответственно максимальные термоупругие напряжения в оболочке твэл определяются соотношением :

$$\sigma_{\theta}|_{z_4} = \sigma_z|_{z_4} = \frac{\alpha_{\text{Ест}} \cdot E_{\text{ст}}}{1 - \mu_{\text{ст}}} (t_{\text{ст}}|_{z_4} - \bar{t}_{\text{ст}}) \quad (8)$$

1.2. Условия на границе раздела: канальная труба - замедлитель.

Уравнения связи в данном случае имеют вид аналогичный с п.1.1:

$$-\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial t_{\text{ст}}}{\partial z} \Big|_{z=z_6} = -\lambda_{\text{ч}} \frac{\partial t_{\text{ч}}}{\partial z} \Big|_{z=z_7} = \alpha_2 (t_{\text{ст}}|_{z_6} - t_{\text{ч}}|_{z_7}) \quad (9)$$

где величина  $\alpha_2$  определяется аналогично (3-7). Величины касательных и осевых напряжений канальной трубы определяются по аналогии с (8).

1.3. Естественные граничные условия.

Рассматриваемый класс условий имеет очевидный (явный) вид:

$$\frac{\partial t_{\text{ст}}}{\partial z} \Big|_{z_9} = 0 ; \quad \frac{\partial t_{\text{ст}}}{\partial z} \Big|_{z_1} = 0 ; \quad \frac{\partial t_{\text{ч}}}{\partial z} \Big|_{z_8} = 0 \quad (10)$$

1.4. Условия межत्वельного теплообмена.

В условиях полного осушения ТВС в следствие МПА межत्वельный (включая канальную трубу и центральную трубу) теплообмен осуществляется в основном за счет теплового (радиационного) излучения.

Если  $q_i$  ( $i = 1, 3 \dots M-1$ ) - плотности тепловых потоков на участвующих в радиационном теплообмене поверхностях, то:



$$\left. \begin{aligned} -\lambda_{ст} \frac{\partial t_{ст}}{\partial z} \Big|_{z_{10}} &= q_1 \\ -\lambda_{ст} \frac{\partial t_{ст}}{\partial z} \Big|_{z_2} &= q_i, \quad i = 3, 5, \dots, M-2 \\ -\lambda_{ст} \frac{\partial t_{ст}}{\partial z} \Big|_{z_5} &= q_{M-1} \end{aligned} \right\} \quad (II)$$

- мгновенные значения величины  $q_i$ , определяются уравнениями баланса энергии:

$$q_i \cdot 2\pi z'_i \cdot \Delta l = Q_i - \sum_{j=1}^{M-1} Q_j \cdot A_{ij}$$

$$\left. \begin{aligned} i &= 1, \dots, M-1 \\ j &= 1, \dots, M-1 \quad j \neq i \quad (i \neq M) \end{aligned} \right\} \quad (I2)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} Q_i &= 6 T_i^4 \cdot 2\pi z'_i \Delta l \\ &- \text{мощность собственного излучения элемента;} \\ Q_j &= 6 T_j^4 \cdot 2\pi z'_j \Delta l \\ &- \text{мощность излучения "соседнего" элемента "j"} \end{aligned} \right\} \quad (I3)$$

$A_{ij}$  - матрица радиационного теплообмена (доля энергии  $j$  - го элемента, поглощаемая  $i$  - тым элементом)

$$z'_i = \begin{cases} z_{10} & \text{для } i = I \\ z_4 & \text{для } i = 3, \dots, M-2 \\ z_5 & \text{для } i = M-1 \end{cases} \quad (I4)$$

Подстановка (I3), (I4) в (I2) приводит к соотношению:

$$q_i = 6 T_i^4 - \sum_{j=1}^{M-1} A_{ij} \frac{T_j^4 \cdot z'_j}{T_i^4 \cdot z'_i} \quad (I5)$$

Матрица радиационного теплообмена  $A_{ij}$ , является независимой от мгновенного поля температур и целиком определяется геометрией элементов в ТВС и их взаимным расположением.

### I.5. Начальные условия.

В качестве начальных условий используется распределение температур, полученных при стационарных условиях эксплуатации ТВС в условиях конвективного теплообмена.

Начальное температурное поле в таком случае определяется решением тех же уравнений (I) при замене граничных условий п.п. I.4 на следующие:

$$-\lambda_{ст} \frac{\partial t_{ст}}{\partial z} \Big|_{z=4} = \alpha_f (t_{ст} \Big|_{z_4} - t_f) \quad (16)$$

Очевидно, что в данной постановке все твэлы находятся изначально в одинаковых условиях.

В (16) приняты обозначения:

$\alpha_f$  - коэффициент теплоотдачи к теплоносителю;

$t_f$  - температура теплоносителя в рассматриваемом сечении ТВС.

Таким образом, совокупность дифференциальных уравнений (I), граничных и начальных условий (2-16) определяет математическую модель рассматриваемого явления.

## II. РАСЧЕТНЫЙ АЛГОРИТМ

Численный алгоритм, реализующий модель (I-16) состоит из двух этапов:

а) вспомогательный этап - определение матрицы радиационного теплообмена,

б) основной этап: решение системы дифференциальных уравнений теплопроводности (I) при системе замыкающих, нелинейных коэффициентов (2-16).

Для реализации основного этапа используется метод МКР (метод конечных разностей). Исходные параболические одномерные уравнения (I) аппроксимируем по методу МКР на 4-х точечном равномерном шаблоне по неявной схеме, позволяющей обеспечить сходимость алгоритма при любом соотношении пространственных ( $\Delta z$ ) и временных ( $\Delta \tau$ ) шагов [2]:

$$\frac{t_e^k - t_e^{k-1}}{a \Delta \tau} = \frac{1}{z_p \cdot \Delta z^2} \left[ z_{p+\frac{1}{2}} \cdot t_{eH}^k - (z_{p+\frac{1}{2}} + z_{p-\frac{1}{2}}) \cdot t_e^k + z_{p-\frac{1}{2}} \cdot t_{e-1}^k \right] + \frac{q_p^k}{\lambda} \quad (17)$$

где:  $\ell = 2, 3, \dots, N-1$   
 $k = 2, 3, \dots, \infty$

Полученная таким образом система алгебраических уравнений имеет трехдиагональную структуру и решается методом прогонки [2].

Так, по известным на момент  $\tau_{k-1}$  замыкающим коэффициентам при двойном обходе пространственных узлов определяется мгновенный профиль узловых температур  $t_k^*$  в момент времени  $\tau_k$  последовательно для всех элементов ТВС. Далее, с учетом имеющихся профилей проводится корректировка в соответствии с (2-15) коэффициентов  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\varphi_i$  и расчет величин напряжений.

Затем проводится расчет поля температур на момент времени  $\tau_{k+1}$ .

Начальный профиль температур определяется тем же алгоритмом при соответствующей замене граничных условий ( II-15) на (16). Для сокращения времени установления используются приближенные аналитические решения стационарной задачи для одиночного твэла [3], используемые в качестве начальных профилей.

Вспомогательный этап задачи реализован также численно с использованием метода Монте-Карло (ММК) по специально разработанному алгоритму. Алгоритм ММК основан на прямом моделировании законов классической оптики и позволяет обеспечить расчет произвольной геометрии ТВС (разнообразные решетки, число твэлов и их размеры).

Алгоритм реализован на ЭВМ БЭСМ-6 и ЕС-1061. Время расчета тестовых вариантов 10-25 мин на ЭВМ БЭСМ-6.

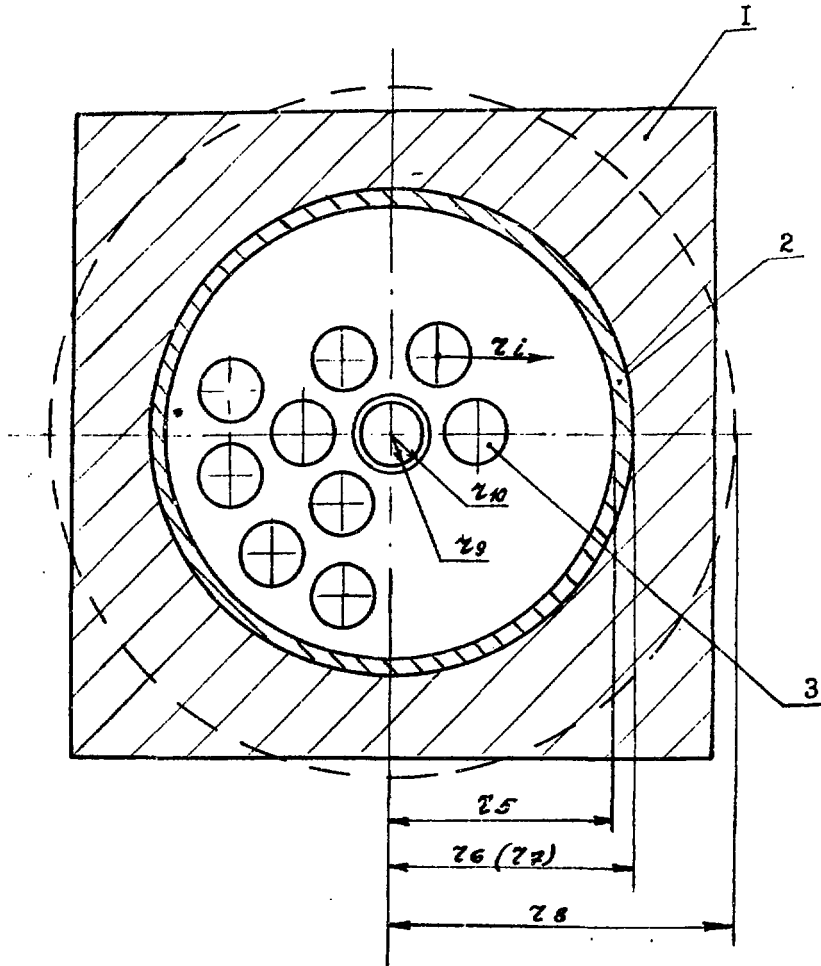


Рис. I. Расчетная схема ТВС:

- I - графит;
- 2 - оболочка ТВС;
- 3 - твэл

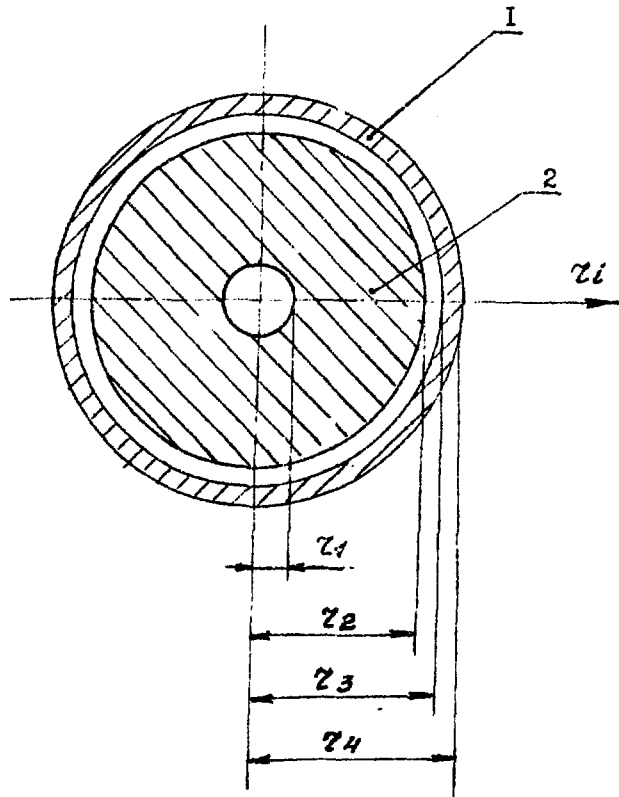


Рис.2. Расчетная схема твэл;

1 - оболочка твэл;

2 - топливо

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлыксов Ю.П. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977.
2. Самарский А.А. Введение в численные методы. М.: Наука, 1987.
3. Задачи по тепломассообмену /Под ред. П.Л.Кириллова. Обнинск, 1985.

Технический редактор **Н. П. Герасимова**

---

Подписано к печати 13.04.1989 г. Т-10066 Бумага писчая № 1  
Формат 60×90<sup>1/16</sup> Усл. п. л. 0,75 Уч.-изд. л. 0,5 Тираж 75 экз.  
Цена 10 коп. Индекс 3624 ФЭИ-1978

---

Отпечатано на ротапринтере.  
249020, г. Обнинск Калужской обл., ФЭИ

10 коп.

Индекс 3624

**Методика расчета температурных полей в тепловыделяющих  
сборках канальных реакторов при авариях с потерей тепло-  
носителя.  
ФЭИ-1978. 1989. 1-12.**