

4. Проведенные исследования подтверждают возможность создания эффективных и надежных систем поверхностного охлаждения и тепловой защиты реакторного оборудования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б. Методы оценки и обеспечения бе-

зопасности ЯЭУ.—М.: Энергоатомиздат, 1988.—136 с.

2. Гершуни А.Н., Нищик А.П., Письменный Е.Н. Особенности тепловых расчетов систем поверхностного охлаждения и тепловой защиты испарительно-конденсационного типа//Промышленная теплотехника. — 2007. — Т. 29, № 3. — С. 60 — 66.

Получено 23.01.2008 г.

УДК 621.039.517.5

АЗАРОВ С.И.<sup>1</sup>, АВРАМЕНКО А.А.<sup>2</sup>,  
СОРОКИН Г.А.<sup>1</sup>, СОРОКИНА Т.В.<sup>2</sup>, СКИЦКО А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований НАН Украины

<sup>2</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕМПЕРАТУРЫ В ТВЭЛ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

В роботі розглядається алгоритм розрахунку температури в ТВЭЛ ядерного реактора методом кінцевих різниць.

В работе дано описание алгоритма расчёта температуры в ТВЭЛ ядерного реактора методом конечных разностей.

The algorithm of the finite-difference method of calculation of temperatures in fuel rods of a nuclear reactor is presented.

$a$  — проводимость;

$A$  — коэффициент, зависящий от температуры выгорания топлива  $T$ ;

$B$  — степень выгорания ядерного топлива ( $UO_2$ );

$C_1 \sim C_4$  — константы, определяемые экспериментально;

$c$  — удельная теплоемкость;

$d$  — диаметр топлива ( $UO_2$ );

$d_{\Gamma}$  — гидравлический диаметр канала ТВС;

$d_M$  — максимальное уплотнение;

$E_1, E_2$  — коэффициенты термической радиации оболочки и таблеток;

$E_{cl}$  — модуль упругости оболочки;

$f_{\Gamma P}$  — коэффициент трения (шероховатость ТВЭЛ);

$G_i$  — величина, зависящая от радиусов молекул газов;

$H = L + 2\delta$  — экстраполированная высота реактора;

$H_{BH}$  — твёрдость таблетки топлива, зависящая от спекания;

$H_g$  — конвекционная теплопередача газа;

$H_S$  — контактная проводимость соприкасающихся мест;

$H_r$  — радиационная проводимость между двумя поверхностями (оболочка-топливо);

$I_0$  — функция Бесселя нулевого порядка;

$J$  — длина пробега молекул;

$j(cw_0), j(cw_1)$  — узлы радиальной координаты на внутренней и наружной поверхностях оболочки;

$j(0)$  — узел в центре таблетки;

$k_i$  — теплопроводность  $i$ -го газа;

$\bar{k}$  — средняя теплопроводность газовой смеси;

$K_v$  — коэффициент неравномерности тепловыделения в активной зоне;

$L$  — эффективная длина ТВЭЛ;

$N_{rod}$  — число ТВЭЛ в активной зоне;

$n, i, j$  — соответственно узлы координаты времени, аксиальной и радиальной координат;

$P_{gas}$  — давление газовой смеси;

$P_{cool}$  — давление теплоносителя;

$P_c$  — контактное давление;

$q_v$  – плотность тепловыделения топлива;  
 $R_f, R_{cl}$  – средняя высота выступов микрошероховатостей поверхностей;  
 $r$  – радиус;  
 $r_1$  – радиус таблетки;  
 $r_2$  – внутренний радиус оболочки;  
 $r_3$  – наружный радиус оболочки;  
 $t, T$  – температура;  
 $T_0, T_1$  – соответственно температура оболочки и таблетки в зазоре;  
 $T_3$  – температура теплоносителя;  
 $T_{cl}$  – средняя температура оболочки;  
 $T_s$  – температура спекания топлива;  
 $T_f^{out}$  – температура поверхности топлива;  
 $T_{cl}^{out}$  – температура наружной поверхности оболочки;  
 $T_{cl}^{in}$  – температура внутренней поверхности оболочки;  
 $v$  – скорость теплоносителя;  
 $W(t)$  – средняя тепловая мощность реактора;  
 $W_{gap}$  – ширина зазора;  
 $W_{gap,0}$  – ширина сразу после изготовления ТВЭЛ;  
 $W_{cl}$  – ширина оболочки;  
 $Z$  – продольная координата;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $\delta = 0,71\lambda_{trans}$  – эффективная компенсация;  
 $\varepsilon_f, \varepsilon_{cl}$  – коэффициенты линейных деформаций топлива и оболочки;  
 $\theta$  – коэффициент, зависящий от условия спекания;  
 $\lambda_{trans}$  – транспортная длина нейтронов;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $\rho$  – плотность;

$\rho_f^t$  – теоретическая плотность топлива;  
 $\tau$  – время;  
 $\varphi_i$  – коэффициент, учитывающий массу  $i$ -го газа в смеси;  
 $\chi_i$  – объёмная доля газов в смеси;  
 $\omega$  – мощность насоса, затраченная на прокачку теплоносителя через ТВС.

**Комплексы:**

$Nu$  – число Нуссельта;  
 $Re = \frac{Vd}{\nu}$  – число Рейнольдса;  
 $Pr = \frac{\nu_T}{\alpha_T}$  – число Прандтля.

**Индексы:**

$0, T, cool$  – теплоноситель;  
 $1, f$  – топливо;  
 $2$  – газовый зазор;  
 $3, cl, об$  – оболочка;  
 $cr$  – ползучесть;  
 $sw$  – поверхность оболочки ( $0$  – внутренняя;  $1$  – наружная);  
 $el$  – упругая деформация;  
 $fw$  – поверхность топлива;  
 $g$  – газовый;  
 $gap$  – зазор;  
 $in$  – внутренний;  
 $out$  – наружный;  
 $r$  – радиационный;  
 $S$  – соприкасающийся;  
 $th$  – термическое расширение;  
 $V$  – объем.

**Введение**

Оценка теплотехнического состояния тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) в процессе эксплуатации ядерной установки является частью проблемы ядерной и радиационной безопасности АЭС, поскольку оболочка ТВЭЛ является одним из главных барьеров, обеспечивающих локализацию продуктов деления в пределах активной зоны реактора.

Для приближенного решения краевых задач теплопроводности в ядерной энергетике применяются такие численные методы, как [1,2]:

- вариационно-разностные методы;

- метод прямых;
- статистические (вероятностные) методы.

Применение численных методов для решения краевых задач теплопроводности всегда приводят к приближенному решению, так как они основаны на замене непрерывной математической модели процесса приближенной дискретной моделью. Однако численные методы дают возможность решать сложные краевые задачи, недоступные для решения аналитическими методами.

В данной работе для решения задач теплообмена в ТВЭЛ ядерного реактора предлагается использовать метод конечных разностей (метод сеток) [3].

**Методы исследования**

Представим ТВЭЛ как систему, состоящую из сердечника (ядерное топливо из окиси урана  $UO_2$ ), газового зазора (газ гелий He) и оболочки ( $Zr1\% Nb$ ), между которыми происходит процесс теплообмена. ТВЭЛ омывается водяным теплоносителем (рис. 1).

В цилиндрическом ТВЭЛ конечной длины  $L$ , радиусом  $r$  при  $\tau < 0$  действуют внутренние ис-

точники теплоты мощностью  $q_v(r)$ ; на поверхности ТВЭЛ заданы граничные условия третьего рода; известны коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_T$  и температура теплоносителя  $T_3$ . Начиная с момента  $\tau = 0$ , мощность тепловыделения  $q_v(r)$  и температура теплоносителя  $T_3$  начинают изменяться во времени.

Запишем дифференциальное уравнение сохранения энергии в цилиндрических координатах следующим образом [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad 0 \leq r \leq r_1, \\ \rho_3 c_3 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad r_2 \leq r \leq r_3, \\ \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0, l} = 0, \\ -\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_1} = -\lambda_3 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_2} = \alpha_{gap} (T_f^{out} - T_{cl}^{in}), \\ -\lambda_3 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_3} = \alpha (T_{cl}^{out} - T_{cool}), \\ \frac{\partial T_{cool}}{\partial \tau} = \alpha_0 (T_{cl}^{out} - T_{cool}) - v \frac{\partial T_{cool}}{\partial z}, \\ T_{cool}(0, \tau) = T_{cl}^{in}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Уравнение (1) является системой нелинейных дифференциальных уравнений. Нелинейность этой системы выражается главным образом в том, что плотность тепловыделения  $q_v$ , коэффициенты теплопроводности  $\lambda$  и коэффициент теплопередачи зазора  $\alpha_{gap}$ , входящие в уравнение, изменяются с изменением температуры.

В тепловыделяющей сборке, расположенной в  $i$ -м кольце, распределение плотности тепловыделения по высоте ТВЭЛ описывается формулой [5]:

$$q_v^i(t, r_i, z) = \frac{4}{\pi d^2 L N_{rod}} W(t) K_v \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{H} z\right) \times I_0(\chi_i, r_i). \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_0$  от поверхности защитной оболочки ТВЭЛ к теплоносителю определяется из следующего соотношения [6]:

$$Nu = \frac{\alpha_0 d_\Gamma}{\lambda_\Gamma} = 0,21 Re^{0,80} Pr_\Gamma^{0,43} (Pr_\Gamma / Pr_3)^{0,25}, \quad (3)$$

Скорость потока теплоносителя равна [9]:

$$v = \sqrt{\frac{2\omega d_\Gamma}{f_{TP} \rho_\Gamma L}}. \quad (4)$$

Теплоперенос в зазоре между сердечником и оболочкой определяется теплопроводностью газа переменного состава и давления через эксцентрический зазор, контактной проводимостью случайных мест касания таблетки и оболочки и радиационной проводимостью.

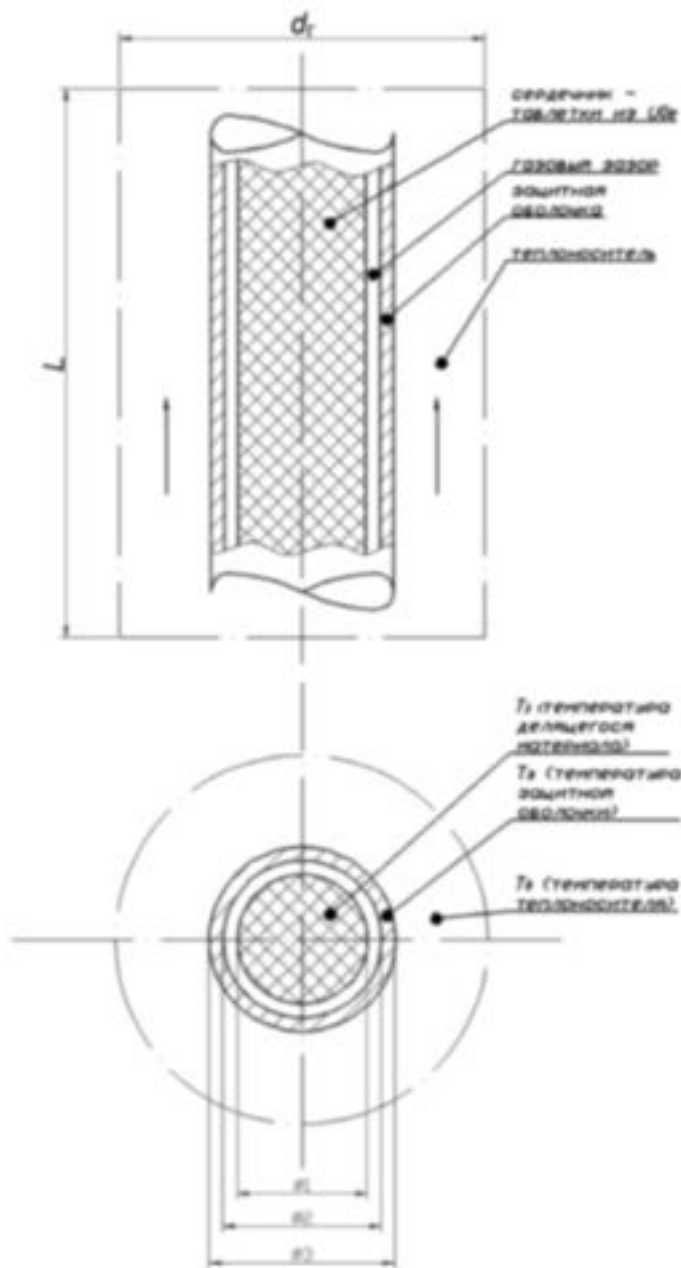


Рис. 1. Тепловыделяющий канал ядерного реактора.

ления (ксенон, криптон и азот) и определяется по формуле:

$$H_g = \frac{\bar{K}}{(2,77 - 2,55 \cdot 10^{-8} P_c)(R_f + R_{cl}) + J + W_{gap}}. \quad (6)$$

Здесь

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^N \frac{k_i \chi_i}{\chi_i + \phi_i}; \quad (7)$$

$$J = \frac{1}{P_{gas}} \sum_{i=1}^N G_i X_i. \quad (8)$$

Контактная проводимость  $H_S$  рассчитывается по формуле [8]:

$$H_S = \frac{2k_f k_{cl} P_c / (k_f - k_{cl})}{[(R_f + R_{cl})/2]^{0,5} H_{BN}}; \quad (9)$$

Радиационная проводимость между двумя поверхностями:

$$H_r = \frac{5,67 \cdot 10^{-12} (T_1^4 - T_0^4)}{(1/E_1 + 1/E_2 - 1)(T_1 - T_0)}. \quad (10)$$

Ширина газового зазора изменяется по мере выгорания топлива и определяется следующим выражением:

$$W_{gap} = W_{gap,0} (1 + \varepsilon_f + \varepsilon_{cl}). \quad (11)$$

Коэффициент линейной деформации топлива  $\varepsilon_f$  состоит из трех составляющих, которые обозначают соответственно уплотнение топлива, распухание топлива и термическое расширение:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_f^d + \varepsilon_f^s + \varepsilon_f^{th}. \quad (12)$$

Здесь

$$\varepsilon_f^d = d_M + e^{-3B} + 2e^{-35B}. \quad (13)$$

Максимальное уплотнение  $d_M$  определяется по формуле

$$d_M = -A \frac{1 - \rho_f^T}{T_s - 1453}. \quad (14)$$

Коэффициент  $\varepsilon_f^s$  имеет смысл только при  $T > 2800$  К и определяется по формуле

При фиксированном значении ширины зазора [7]:

$$a_{gap} = H_g + H_S + H_r. \quad (5)$$

Конвекционная теплопередача газовой смеси под оболочкой ТВЭЛ  $H_g$  изменяется в течение кампании работы ядерного реактора вследствие выхода из таблеток газообразных продуктов де-

$$\varepsilon_f^s = 8,8 \cdot 10^{-50} (2800 - T)^{11.73} \times \exp[-0,0162 \cdot (2800 - T)] \exp(-8 \cdot 10^{-21} B). \quad (15)$$

Коэффициент  $\varepsilon_f^{th}$  рассчитывается по следующей формуле:

$$\varepsilon_f^{th} = 10^{-5} T - 3 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-2} \exp\left(\frac{-6,9 \cdot 10^{-20}}{1,38 \cdot 10^{-23} T}\right). \quad (16)$$

Коэффициент линейной деформации оболочки состоит из трех составляющих, которые обозначают соответственно ползучесть, упругую деформацию и термическое расширение:

$$\varepsilon_{cl} = \varepsilon_{cl}^{cr} + \varepsilon_{cl}^{el} + \varepsilon_{cl}^{th}. \quad (17)$$

Здесь

$$\varepsilon_{cl}^{cr} = 0,75 \cdot 10^{-10} R_{cl} (P_{cool} - P_{gas}) \sqrt{0,88148 B} \frac{1}{W_{cl}}. \quad (18)$$

Коэффициент  $\varepsilon_{cl}^{el}$  определяется по формуле

$$\varepsilon_{cl}^{el} = (R_{cl} - w_{cl}) \frac{P_{gas} [(R_{cl} - w_{cl})^2 + R_{cl}^2] - 2P_{cool} R_{cl}^2}{E_{cl} [R_{cl}^2 - (R_{cl} - w_{cl})^2 + P_{gas}]}. \quad (19)$$

Разностные уравнения для дифференциальных уравнений (1) могут быть представлены в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{a_{f,i,j}^n r_{j+1/2} (T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n) - r_{j-1/2} (T_{i,j}^n - T_{i,j-1}^n)}{r_j (\Delta r)^2} + \frac{q_{i,j}^n}{\rho_{f,i,j}^n c_{p f,i,j}^n}, \\ 0 < r < r_1; \\ \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{a_{cl,i,j}^n r_{j+1/2} (T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n) - r_{j-1/2} (T_{i,j}^n - T_{i,j-1}^n)}{r_j (\Delta r)^2}, \\ r_2 < r < r_3; \\ \frac{T_{i,1}^n - T_{i,0}^n}{\Delta r} = 0, \quad r = 0; \\ \frac{T_{i,j(fw)}^n - T_{i,j(fw)-1}^n}{\Delta r} = \frac{\alpha_{G,i}^n}{\lambda_{f,i,j(fw)}^n} (T_{i,j(fw)}^n - T_{i,j(cw_0)}^n), \quad r = r_1; \\ \frac{T_{i,j(cw_0)+1}^n - T_{i,j(cw_0)}^n}{\Delta r} = \frac{\alpha_{G,i}^n}{\lambda_{cl,i,j(cw_0)}^n} (T_{i,j(fw)}^n - T_{i,j(cw_0)}^n), \quad r = r_2; \\ \frac{T_{i,j(cw_1)}^n - T_{i,j(cw_1)-1}^n}{\Delta r} = \frac{\alpha_i^n}{\lambda_{cl,i,j(cw_1)}^n} (T_{i,j(cw_1)}^n - T_{cool,i}^n), \quad r = r_3; \\ \frac{T_{cool,i}^{n+1} - T_{cool,i}^n}{\Delta t} = \alpha_{0,i}^n (T_{i,j(cw_1)}^n - T_{cool,i}^n) - \nu^n \frac{T_{cool,i+1}^n - T_{cool,i}^n}{\Delta z}, \quad r = r_0; \end{array} \right. \quad (20)$$

Упомянутая выше система разностных уравнений является полной математически закрытой системой и разрешается последовательно.

Схема явной разности приведена на рис.2.

### Исходные данные для расчётов

Расчёт проводился для тепловыделяющей сборки (ТВС) ядерного реактора типа ВВЭР-1000

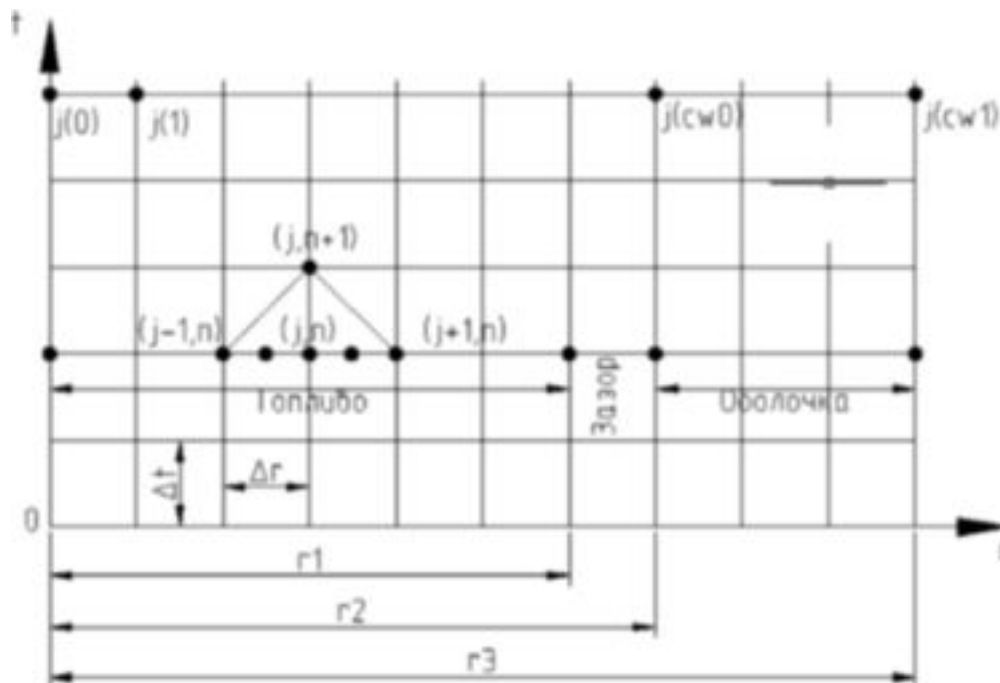


Рис. 2. Схема разности.

(В-320). ТВЭЛ диаметром 9,1×0,65 мм, длиной 3500 мм. Давление на выходе из активной зоны реактора 15,7 МПа, температура теплоносителя на входе ТВС 563,7 °С, на выходе – 593 °С, расход теплоносителя через реактор 60 м<sup>3</sup>/ч. Расчёты проводились при работе реакторной установки на номинальной мощности. Исследуемый ТВЭЛ находился в центре активной зоны ядерного реактора.

Теплопроводность спеченной двуокиси урана (UO<sub>2</sub>) обычно изменяется не только с изменением температуры, но и по мере спекания при изготовлении и определяется следующим образом [10]:

$$\lambda_f = \frac{1 - \theta(1 - \rho_f^T)}{1 - 0,05\theta} \left( \frac{C_1}{C_2 + T} + C_3 \exp(C_4 T) \right). \quad (21)$$

Удельная теплоемкость и плотность двуокиси урана изменяются с изменением температуры так:

$$c_f = 3,58 \cdot 10^4 + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 8,553 \cdot 10^{-10} T^2 + 1,99 \cdot 10^{13} T^3 \quad (\text{Дж/кг} \cdot \text{К}), \quad (22)$$

$$\rho_f = 11,5023 \cdot 10^3 - 0,339 T - 1,08 \cdot 10^{-4} T^2 \quad (\text{кг/м}^3). \quad (23)$$

Зависимость коэффициента теплопроводности сплава Zr + 1%Nb от температуры представлена на рис.3.

Удельная теплоёмкость оболочки из сплава Zr1%Nb изменяется с изменением температуры следующим образом [10]:

$$c_{Zr} = 262 + 17734(1125,6 - T). \quad (24)$$

Зависимость теплопроводности газообразного гелия от температуры представлена на рис.4.

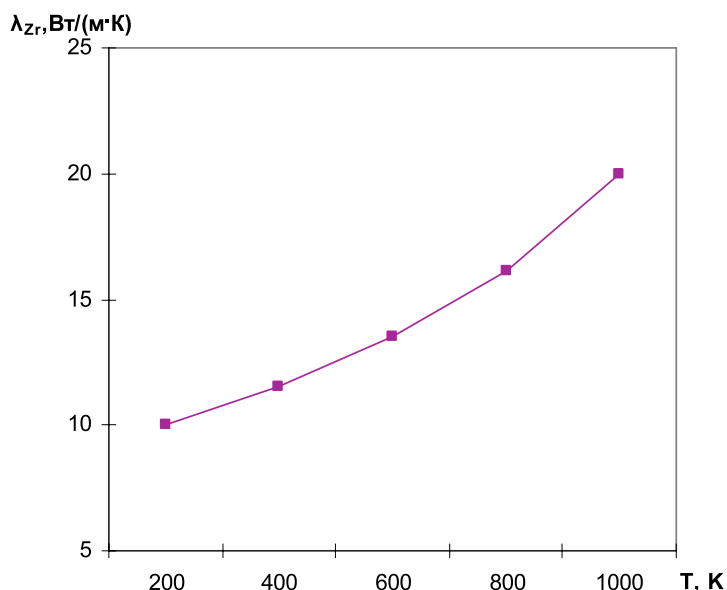


Рис. 3. Изменение коэффициента теплопроводности оболочки ТВЭЛ от температуры.

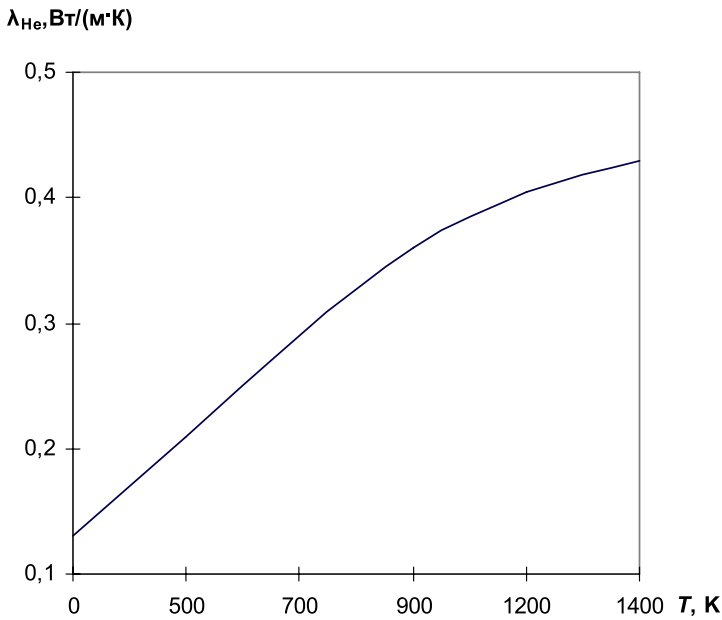


Рис. 4. Зависимость теплопроводности газообразного гелия от температуры.

**Результаты расчета**

Система уравнений (20) позволила по известным значениям  $T_{i,j}$ ,  $a_{f,j}$ ,  $\lambda_{f,j}$ ,  $q_{i,j}$ ,  $c_p$  на временном слое  $(j-1, n)$  ( $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ) методом прогонки определить искомые параметры ( $T_{UO_2}^{max}$ ,  $T_{об}$ ,  $q_{UO_2}$ ) на слое  $(j+1)$  путём повторного применения метода прогонки. При этом шаг по времени удовлетворял условию Кузанта [11]:

$$\Delta t < \frac{(\Delta r)^3}{2} \left\{ \frac{1}{a_{f,i,0}^n} + \frac{\Delta r [j(cw_0) - 1]}{a_{cl,i,j}(cw_0)^n} \right\}. \quad (25)$$

Условие устойчивости для системы уравнений (20) определялось главным образом двумерными разностными уравнениями:

$$\begin{cases} A_0(r,t) = \frac{a_{f,i,j}^n}{r_j}, & 0 < r < r_1, \\ A_0(r,t) = \frac{a_{cl,i,j}^n}{r_j}, & r_2 < r < r_3. \end{cases} \quad (26)$$

Итерационный процесс заканчивается при выполнении следующих условий:

$$\left| \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} \right| \leq \delta. \quad (27)$$

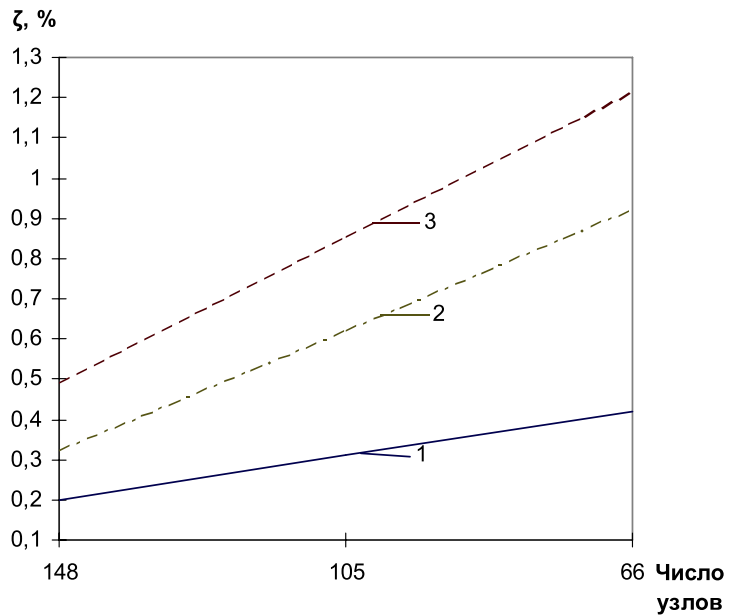


Рис. 5. Зависимость относительной ошибки теплофизического расчёта метода конечных разностей от числа узлов:

- 1 –  $T_{UO_2}^{max}$  – максимальная температура в центре топлива;
- 2 –  $q_v^{max}$  – максимальное тепловыделение в ядерном топливе;
- 3 –  $\bar{T}_{об(Zr1\%Nb)}$  – средняя температура оболочки.

Точность аппроксимации на сгущающихся сетках (рис. 2) была проверена по правилу Рунге [12].

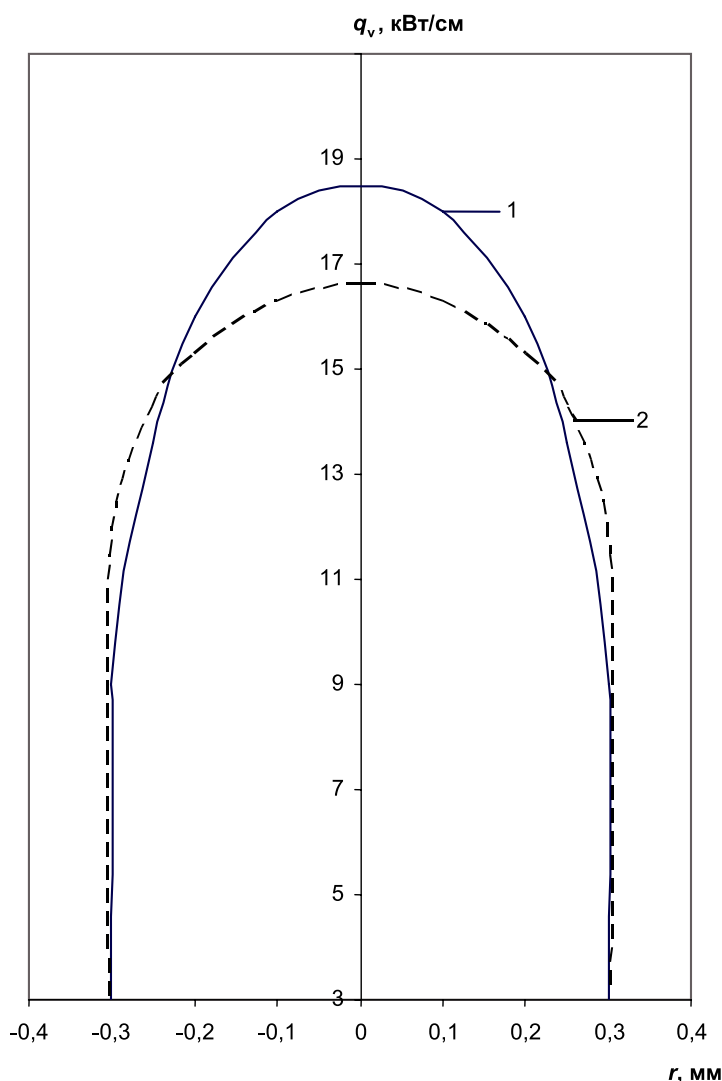
На рис. 5 приведена зависимость относительной ошибки теплофизического расчёта в ТВС от числа узлов.

На рис. 6 представлены результаты сравнения рассчитанного по МКР и аналитическим методом распределения тепловыделения по радиусу ядерного топлива.

На рис. 7 представлены сравнительные результаты расчёта температурного поля в ТВС, полученные разными методами. Из рис. 7 видно, что основные перепады температур наблюдаются в топливной таблетке и в контактном слое.

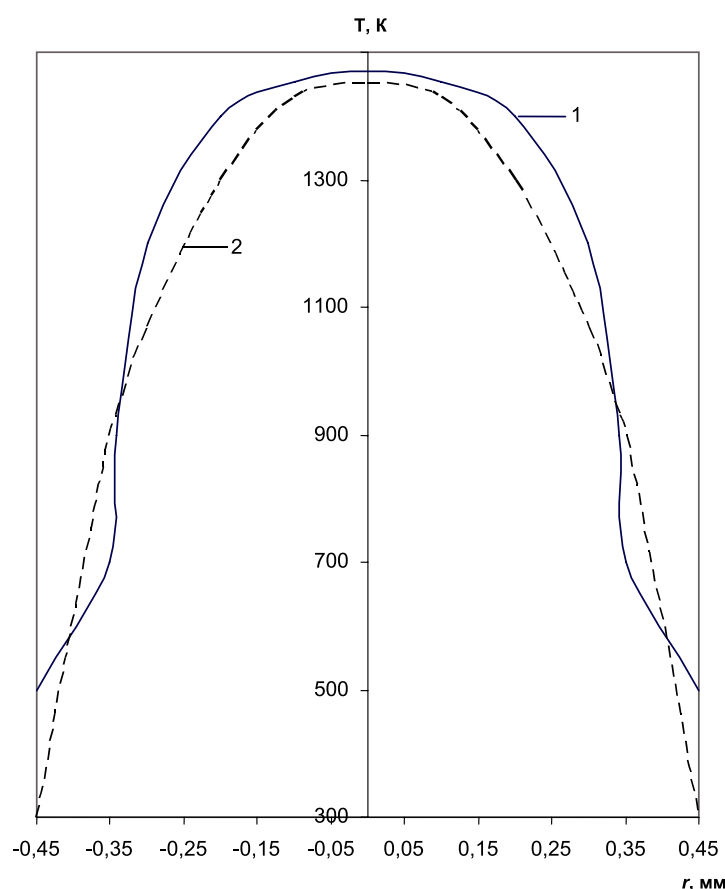
**Выводы**

1. Разработана теплофизическая модель ТВС и приведены исследования теплофизических процессов, которые имеют место при авариях, аналитическим и численным методом. Выпол-



**Рис. 6. Распределения тепловыделения по радиусу ядерного топлива: 1 – расчет по МКР; 2 – аналитический расчет [13].**

нен сравнительный анализ различных методов расчета. Показано, что аналитический метод является наиболее эффективным при незначительных изменениях теплофизических параметров. При переходных процессах эффективно использовать численный метод. Приведены результаты решения дифференциальных уравнений в частных производных разностным методом, с помощью которых проанализирована температура процесса в ТВЭЛ ядерного реактора. Рассмотрены условия устойчивости и сходимости решения при вычислении дифференциальных уравнений МКР. Метод конечных разностей основывается на модульном принципе построения программ,



**Рис. 7. Распределение температурного поля в ТВЭЛ: 1 – расчет по МКР; 2 – аналитический расчет [13].**

что позволяет использовать при расчетах такие программные продукты, как Matlab или Mathcad.

2. Предложенная модель позволяет проводить сравнительный анализ аналитическими и приближенными методами, определять оптимальное количество узлов разбиения, а также проводить расчеты для действующих реакторов с учетом переходных процессов, что особенно актуально в связи с планами использования энергетических реакторов в маневренных переходных режимах и значительно повышает требования к теплотехнической надежности и безопасности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зарубин В.С. Инженерные методы решения задач теплопроводности. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.



2. *Беляев Н.М., Рядно А.А.* Методы теории теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1982. – Ч.1. – 327 с., Ч.2. – 304 с.
3. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 736 с.
4. *Suzuki M.* FEMFXI-III. A computer code for analysis of LWR fuel rod by finite element method, JAERI-M-89, 1991–130 p.
5. *Фрост Б.* ТВЭЛы ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
6. *Теплообмен* в ядерных энергетических установках / Под ред. Б.С. Петухова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 412 с.
7. *Ма Б.М.* Материалы ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 408 с.
8. *Галин Н.М., Кириллов П.Л.* Тепломассообмен (в ядерной энергетике) – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 378 с.
9. *Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А.* Теплообмен в ядерных энергетических установках – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 472 с.
10. *Чиркин В.С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968. – 130 с.
11. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 293 с.
12. *Калиткин Н.И.* Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 360 с.
13. *Азаров С.И., Сорокин Г.А., Сорокина Т.В.* Расчет температуры в ТВЭЛе ядерного реактора // Пром. теплотехника. – 2005. – Т. 27, №5. – С. 70–75.

Получено 05.07.2007 г.