

УДК 621.039.517.5

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

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

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

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТВЭЛЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Розглядається методика розрахунку температур в ТВЭЛі з різними елементами і їх теплофізичними властивостями і енерговиділеннями. Наводиться співвідношення для розрахунку температурних перехідних процесів у технологічному каналі. Отримані результати розрахунку використовуються для оцінки допустимого рівня температур у матеріалах ТВЭЛа.

Рассматривается методика расчёта температур в ТВЭЛе с различными элементами и их теплофизическими свойствами и энерговыделениями. Приводятся соотношения для расчёта температурных переходных процессов в технологическом канале. Полученные результаты расчёта используются для оценки допустимого уровня температур в материалах ТВЭЛа.

The method of calculation of temperatures in fuel rods with different elements and their thermophysical properties and power flux is examined. It is brought correlations over for the calculation of temperature transitional processes in a fuel channel. The received results of calculation are used for estimation of possible level of temperatures in materials of fuel rod.

$A_1, A_2, A_3, A_4$  – неизвестные коэффициенты;  
 $a_r$  – коэффициент теплоотдачи зазора между делящимся материалом и защитной оболочкой;

$a_T$  – коэффициент теплоотдачи ТВЭЛа;

$B$  и  $D$  – постоянные;

$C_1$  – теплоемкость делящегося материала;

$d_r$  – гидравлический диаметр канала;

$f_{TP}$  – коэффициент трения (зависит от шероховатости поверхности ТВЭЛа);

$\bar{h}$  – средний зазор между делящимся материалом и защитной оболочкой при рабочих условиях;

$L$  – длина ТВЭЛа;

$Nu$  – число Нуссельта;

$Pr = \frac{v_T}{\alpha_T}$  – число Прандтля;

$P_K$  – давление на контакте;

$q_v(R)$  – внутренние источники теплоты;

$R$  – радиус ТВЭЛа;

$Re = \frac{V_T d_r}{\nu_T}$  – число Рейнольдса;

$S$  – комплексная переменная преобразования Лапласа;

$T$  – температура теплоносителя;

$V_T$  – скорость потока теплоносителя;

$\Delta \hat{\theta}(r, t)$  – преобразование Фурье, выраженное для безразмерной температуры;

$J_0(\mu_1^{1/2} \bar{r}_1), J_0(\mu_2^{1/2} \bar{r}_2), K_1(\mu_1^{1/2} \bar{r}_1), K_2(\mu_2^{1/2} \bar{r}_2)$  – цилиндрические функции мнимого аргумента (функции Бесселя);

$\alpha_r, \alpha_K$  – коэффициенты теплопроводности газа и контактирующих твердых тел;

$\beta$  – положительные корни трансцендентного уравнения;

$\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности делящегося материала и защитной оболочки ТВЭЛа;

$\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя;

$\nu_T$  – кинематический коэффициент вязкости теплоносителя;

$\rho_1$  – плотность делящегося материала;

$\rho_T$  – плотность теплоносителя;

$\tau$  – момент времени;

$\omega$  – мощность, потраченная на прокачку теплоносителя.

В последние два года продолжается процесс перехода на новое ядерное топливо на АЭС Украины. К примеру, поставляемые из России модернизированные тепловыделяющие сборки альтернативной конструкции (ТВСа), которые имеют существенно лучшие показатели эффективности теплоиспользования, позволили увеличить топливную кампанию до 360 суток на Запорожской АЭС.

С другой стороны, на трех энергоблоках Южно-Украинской АЭС эксплуатируются установленные фирмой-изготовителем (компания «Вестингауз» США) альтернативные ТВС вместе со штатными.

При пуске, остановке, переходных режимах и в аварийных ситуациях температурные поля в наиболее ответственном элементе ядерного реактора – ТВЭЛе будут меняться во времени. Проблема достоверного определения температурного состояния ТВС является в атомной энергетике одной из важнейших, от успешного решения которой зависят возможности повышения надежности, эффективности и ресурса работы ядерного реактора.

Существующие методы определения распределения температур в ТВЭЛах ядерного реактора основаны на решении уравнения теплопроводности в неограниченном цилиндре и, в общем случае, для движущейся тепловыделяющей среды [1-3]. Однако возможность их использования на практике для решения нелинейных задач и нестационарных тепловых процессов тел сложной формы не нашла отражение в этих работах, а приведенные результаты расчёта с трудом поддаются обобщению. В связи с этим существует большая потребность в создании новых методов расчёта температур в ТВЭЛе для трехмерного случая с изменением температур и тепловыделения во времени и пространстве.

Целью данной работы является построение математической модели ТВЭЛа для расчёта уточненного аналитического определения температурного поля при различных режимах работы ядерного реактора.

ТВЭЛ представляет собой стержень (или набор таблеток) из делящегося материала и заточён в герметичную защитную цилиндрическую оболочку. Между таблетками и защитной оболочкой имеется контактный слой, заполненный инерт-

ным газом. Защитная оболочка ТВЭЛа омывается теплоносителем (рис. 1).

Для аналитического описания процессов теплообмена в канале ядерного реактора были приняты следующие допущения:

1. ТВС состоит из идентичных ТВЭЛов с одинаковым тепловыделением;
2. Плотность потока нейтронов одинаково распределена по всему объему ТВЭЛа;
3. Переток тепла в осевом направлении отсутствует;
4. Поток теплоносителя равномерно распределен по технологическим каналам.

Рассмотрим метод расчета нестационарного температурного поля для цилиндрического ТВЭЛа с защитной оболочкой. В цилиндрическом ТВЭЛе конечной длины  $L$ , радиусом  $R$  при  $\tau < 0$  действуют внутренние источники тепла мощностью  $q_v(R)$ ; на поверхности ТВЭЛа заданы граничные условия третьего рода; известны коэффициенты теплоотдачи  $a_T$  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 в следующем виде [4]:

– для делящегося материала:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial R_1^2} + \frac{1}{R_1} \frac{\partial T_1}{\partial R_1} \right) + a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial Z^2} + a_1 \lambda_1^{-1} q_{v_1}(\tau), \quad (1)$$

с начальным условием:

$$T_1(R, 0) = T_1(R), \quad (2)$$

и граничными условиями по радиусу:

$$\frac{\partial T_1(0, r)}{\partial R_1} = 0, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial R_1} \right) = \lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial R_2} \right), \quad (4)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(R, \tau)}{\partial R_1} = a_1 [T_1(R, \tau) - T_2], \quad (5)$$

здесь

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{C_1 \rho_1}. \quad (6)$$

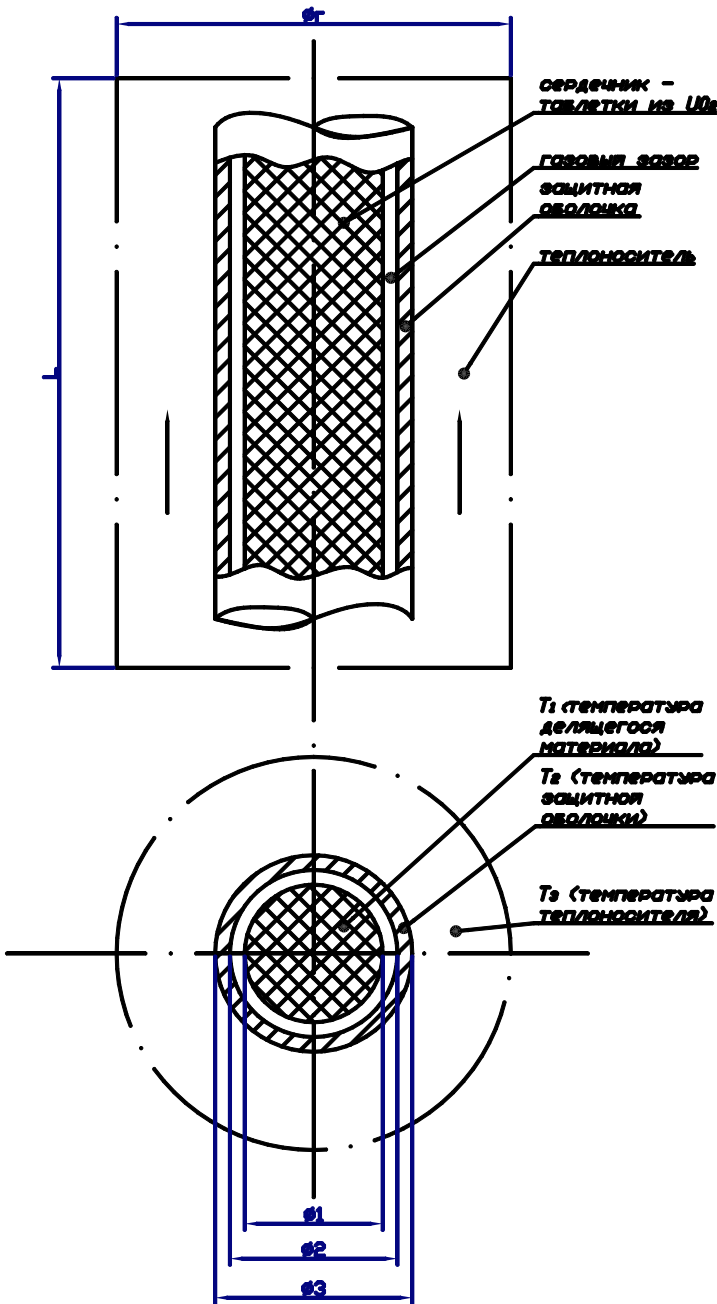


Рис. 1. Тепловыделяющий канал ядерного реактора.

Для коэффициента теплоотдачи зазора между делящимся материалом и защитной оболочкой было использовано следующее соотношение [5]:

$$a_r = \frac{\alpha_r}{0,5\bar{h} + B(R_1 + R_2) + (q_{v1} + q_{v2})} + \frac{\alpha_k P_k}{D(R_1^2 + R_2^2)^{1/4}}, \quad (7)$$

— для защитной оболочки:

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial R_2^2} + \frac{1}{R_2} \frac{\partial T_2}{\partial R_2} \right) + a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial Z^2} + a_2 \lambda_2^{-1} q_{v2}(\tau), \quad (8)$$

с начальным условием:

$$T_2(R, 0) = T_2(R), \quad (9)$$

и граничными условиями:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(R_2, \tau)}{\partial R_2} = a_T [T_2(R_2, \tau) - T_3(\tau)]. \quad (10)$$

Коэффициент теплоотдачи  $a_T$  от поверхности защитной оболочки ТВЭЛа к теплоносителю определяется из следующего соотношения [6]:

$$Nu = \frac{a_3 d_r}{\lambda_T} = 0,021 Re^{0,80} Pr_T^{0,43} (Pr_T / Pr_{3,0})^{0,25}. \quad (11)$$

Скорость потока теплоносителя равна [5]:

$$V_T = \sqrt{\frac{2\omega d_r}{f_{TP} \rho_T L}}. \quad (12)$$

Граничные условия по координате  $Z$  имеют следующий вид:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = -f_0, \quad (13)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial Z} + a_r (T_1 - T_2) \Big|_{Z=\delta} = 0. \quad (14)$$

Введем безразмерные величины:

$$r_1 = \frac{\bar{R}}{R_1}; \quad z = \frac{Z}{R_1}; \quad \bar{r}_1 = \frac{R_1}{R_L}; \quad r_2 = \frac{R_2}{R_L}; \quad l = \frac{L}{R_1};$$

$$\theta_1 = \frac{T_1 - T_2}{T_2}; \quad \theta_2 = \frac{T_2 - T_3}{T_3}; \quad \delta = \frac{\bar{\sigma}}{R_L}; \quad t = \frac{\tau}{\tau_0}.$$

Тогда задача (1-14) с использованием последовательного интегрального преобразования Лапласа по координате и косинус преобразования Фурье по времени запишется следующим образом [4]:

$$\begin{cases} \theta(\bar{r}_1, \tau) = A_1 J_0(\mu_1^{1/2} \bar{r}_1) + A_2 K_1(\mu_1^{1/2} \bar{r}_1) + \frac{1}{\mu_1} P_1(\beta, S), \\ \theta(\bar{r}_2, \tau) = A_3 J_0(\mu_2^{1/2} \bar{r}_2) + A_4 K_2(\mu_2^{1/2} \bar{r}_2) + \frac{1}{\mu_2} P_2(\beta, S); \end{cases} \quad (15)$$

здесь

$$\mu_1 = \beta^2 + \frac{S}{K_1}; \quad K_1 = \frac{a_1 \tau_0}{r_1}; \quad (16)$$

$$\mu_2 = \beta^2 + \frac{S}{K_2}; \quad K_2 = \frac{a_2 \tau_0}{r_2^2}; \quad (17)$$

$$P_1(\beta, S) = \frac{r_1^{-2} \sin(\beta, l) q_{V1}}{T_1 \lambda_1 \beta S}; \quad (18)$$

$$P_2(\beta, S) = \frac{r_2^{-2} \sin(\beta, l) q_{V2}}{T_2 \lambda_2 \beta S}, \quad (19)$$

где  $\beta$  – положительные корни трансцендентного уравнения:

$$M = \beta \cdot \text{tg}(\beta \cdot l). \quad (20)$$

Для упрощения системы (15) разложим функцию Бесселя в ряд Тейлора [7] относительно координаты  $r_1$  и ограничимся вторым порядком малости  $\delta$ . Тогда по правилу Крамера [8] в системе (15) найдем неизвестные коэффициенты.

Для получения оригинала в системе уравнений (15) воспользуемся формулой обращения [9]:

$$\Delta \hat{\theta}(\bar{r}, t) = T(\bar{r}, t) - T_3(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{A-i\infty}^{A+i\infty} [\hat{\theta}(\bar{r}_1, t) - \hat{\theta}(\bar{r}_2, t)] \cdot \exp(S \cdot t) dS, \quad (21)$$

здесь

$$S = a + ib, \quad i = (-1)^{1/2}. \quad (22)$$

Переход от безразмерной температуры к избыточной температуре осуществляли с помощью формулы обращения для интегрального косинус-преобразования Фурье [10]:

$$\bar{\theta}(t) \Big|_{r=R_2} - \bar{\theta}(t) \Big|_{r=R_1} = 2 \times \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ \frac{\rho_j^2 + \eta_2^2}{L(\beta_j^2 + \eta_2^2) + \eta_2} \left[ \hat{\theta}(\tau) \Big|_{r=R_2} - \hat{\theta}(\tau) \Big|_{r=R_1} \right] \cdot \cos(\beta_j \delta) \right\}, \quad (23)$$

здесь

$$\eta_2 = \frac{a_T R_1}{\lambda_2}. \quad (24)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи теплообмена в ТВЭЛе. Например, если мощность внутренних источников тепла не меняется ( $q_{V1} = \text{const}$ ,  $q_{V2} = \text{const}$ ), а температура теплоносителя в момент времени  $\tau_0$  меняется скачком на

некоторую величину  $\bar{T}_3$ , то

$$\begin{aligned} \theta(\bar{r}, t) &= T(\bar{r}, t) - T_3(t) = \\ &= \frac{2}{r^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_i \cdot \bar{r}/R)}{J_1^2(\mu_i)} \exp(-a_T \mu_i^2 t/R^2) \int_0^R r \times \\ &\times f_0(t) J_0(\mu_i \cdot \bar{r}/R) d\bar{r}. \end{aligned} \quad (25)$$

Расчет проводился для ТВЭЛа размером  $\Phi_0 = 9,1 \cdot 0,65$  мм,  $L_0 = 3500$  мм. Теплопроводность защитной оболочки задавалась линейной зависимостью от температуры [11]:

$$\lambda_2 = \lambda_0 (1 + \beta_\lambda T). \quad (26)$$

Теплопроводность  $\text{UO}_2$  достаточно резко изменяется с температурой [5], поэтому ее определяли по формуле:

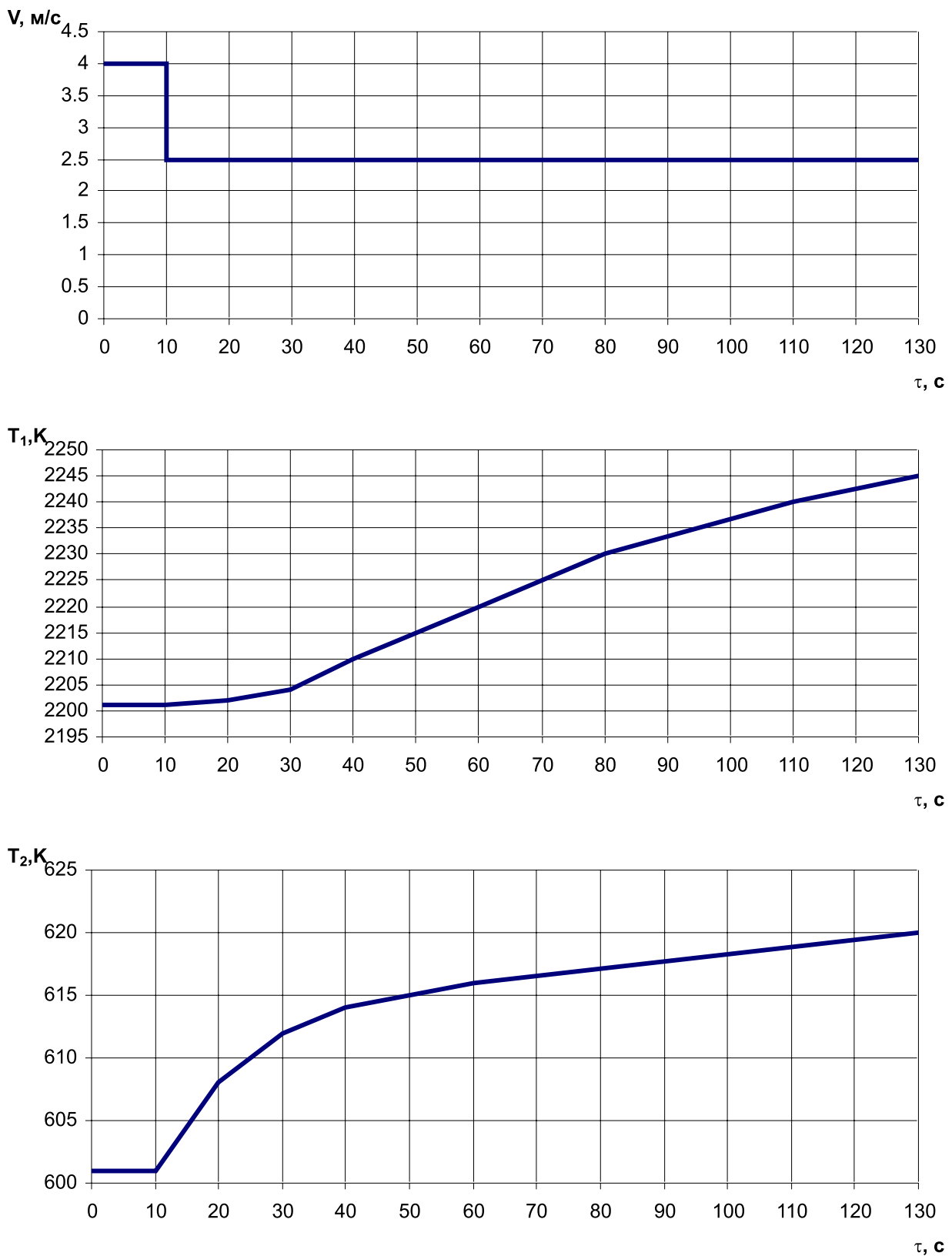
$$\lambda_1 = \int_{T_1}^{T_2} \lambda_0(T) dT. \quad (27)$$

На рис. 2 приведены рассчитанные по вышеприведенным формулам изменения температуры в центре ТВЭЛа и на наружной поверхности стенки защитной оболочки при скачкообразном уменьшении расхода теплоносителя в технологическом канале при работе ядерного реактора на номинальной мощности. Из рис. 2 видно, что при заданном переходном температурном режиме температуры в центре ТВЭЛа и на внешней поверхности защитной оболочки не превышают допустимые значения. Приведенные на рис. 2 данные хорошо согласуются с результатами, полученными в работе [12].

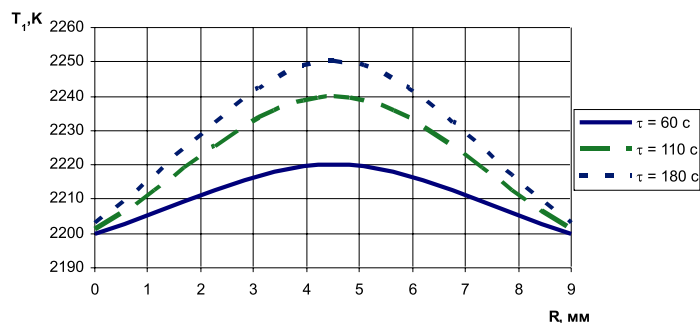
Характер и изменения температуры по радиусу и высоте ТВЭЛа при скачкообразном изменении скорости теплоносителя от 4,0 до 2,5 м/с иллюстрируются на рис. 3 и 4.

Полученные аналитические выражения позволяют проводить оценку распределения температур по радиусу и высоте ТВЭЛа в любой момент времени как при изменении температуры теплоносителя, так и мощности энерговыделения в делящемся материале при различных режимах работы ядерного реактора.

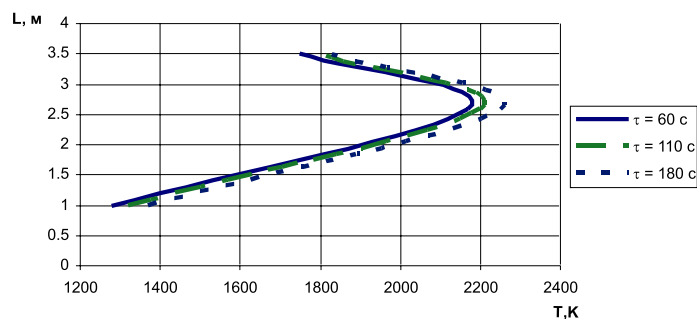
Следует отметить, что динамика изменения температур в ТВЭЛе определяется в основном



**Рис. 2. Изменение температуры в центре делящегося материала и наружной поверхности защитной оболочки при скачкообразном изменении скорости теплоносителя.**



**Рис. 3** Радиальное распределение температур в центре делящегося материала ТВЭЛа, рассчитанное в разные промежутки времени.



**Рис. 4** Высотное распределение температур в центре делящегося материала ТВЭЛа, рассчитанное в разные промежутки времени.

влиянием теплоносителя и энерговыделением, которые характеризуются коэффициентами теплопередачи  $a_T$ ,  $a_G$ , которые зависят от физической природы процесса теплообмена и исходных параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности — М.: Высшая школа, 1967 — 406 с.
2. Зарубин В.С. Инженерные методы решения задач теплопроводности. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 328 с.
3. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1982. — Ч.1. — 327 с, Ч.2. — 304 с.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1972. — 736 с.
5. Фрост Б. ТВЭлы ядерных реакторов: Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 248 с.
6. Теплообмен в ядерных энергетических установках // Под ред. Б.С. Петухова. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 412 с.

7. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: Наука, 1969. — Т.1. — 608 с.

8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике — М.: Наука, 1970. — 720 с.

9. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования и операционное исчисление М.:Наука, 1974. — 544 с.

10. Грантер К.Д. Интегральные преобразования в математической физике. М.: Госиздат технико-теоретической литературы, 1966. — 204 с.

11. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок. Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 408.

12. Перимов Р.Р., Сорокин Г.А., Сорокина Т.В. Моделирование теплотехнической надежности ТВЭЛа при различных вариантах изменения энерговыделения и температур // Промышленная теплотехника. — 2004. — Т.26, №5. — С. 150-153.

Получено 10.06.2005 г.