

УДК 632.039.577:536.2 (075.8)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В КАНАЛЕ УРАН-ГРАФИТОВОГО РЕАКТОРА С ТВЭЛАМИ ВТУЛОЧНОГО ТИПА

А.Н. ЧЕРЕПАНОВ¹, В.Н. ПОПОВ¹, А.Э. ДЕТЦЕЛЬ², А.Б. АЛЕКСАНДРОВ²,
А.И. ДРОБЯЗ²

¹Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

²ОАО Новосибирский завод химконцентратов

Разработана двумерная математическая модель нестационарных теплофизических процессов в промышленном канале уран-графитового реактора с конверсионными твэлами втулочного типа. На основе предложенной модели построены численный алгоритм и компьютерная программа для исследования температурных полей в алюминиевом сердечнике, твэле, оболочке, а также в охлаждающей воде, с учетом конструктивных и технологических особенностей сборки. Приведены результаты некоторых вычислительных экспериментов, характеризующих распределения температурных полей в столбе твэлов и охлаждающей воде.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается ячейка промышленного уран-графитового реактора (рис. 1), состоящая из столба твэлов втулочного типа с алюминиевым сердечником, заключенного в алюминиевую оболочку, кольцевого водоохлаждаемого канала, алюминиевой трубы и графитовой втулки. Особенностью рассматриваемой конструкции твэлов является наличие у них впадин на глухих торцах и кольцевых канавок на сварных. Ядерное топливо равномерно распределено в виде дисперсных частиц UO_2 в алюминиевой матрице. Кроме того, сборка столба твэлов содержит сплошные алюминиевые вставки различной высоты, распределенные по высоте столба по заданной схеме.

При построении математической модели учитываются следующие факторы: конечность длин твэлов и алюминиевых вставок, наличие закруглений на торцах твэлов, неравномерность тепловыделения по высоте их

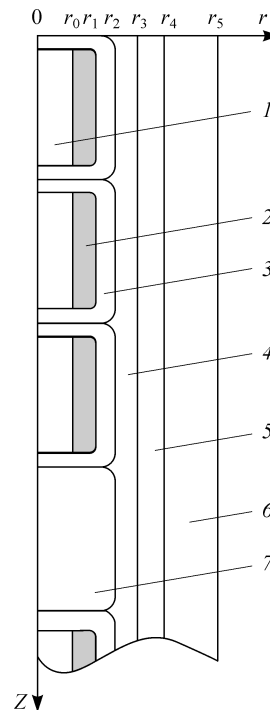


Рис. 1. Схема ячейки промышленного реактора с дисперсионными твэлами втулочного типа.

1 — алюминиевый сердечник, 2 — тепловыделяющий элемент, 3 — алюминиевая оболочка, 4 — охлаждающая вода, 5 — алюминиевая труба, 6 — графитовая втулка, 7 — алюминиевая вставка.

столба, влияние контактного термического сопротивления впадин и канавок на торцах твэлов на теплообмен между ними.

Целью исследования является изучение влияния указанных конструктивных особенностей на температурные поля и тепловые потоки в рассматриваемой системе.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

2.1. Основные предположения и допущения

Для построения математической модели примем следующие допущения:

1) тепловыделение осуществляется только в области расположения ядерного топлива ($r_0 \leq r \leq r_1$) с постоянной по кольцевому сечению твэла и переменной по высоте столба объемной плотностью энерговыделения;

2) контактные термические сопротивления между алюминиевым стержнем и твэлом, а также между твэлом и его оболочкой пренебрежимо малы;

3) поток охлаждающей воды гидродинамически стабилизирован;

4) теплофизические параметры материалов твэла и теплоносителя зависят лишь от их собственной температуры;

5) в торцевых углублениях твэлов теплоноситель может находиться в жидком $T < T_n$ или парообразном $T \geq T_n$ состояниях, где T_n — локальная температура насыщения.

В реальных условиях ширина водоохлаждаемого кольцевого канала много меньше диаметра твэлов в технологической трубе, поэтому распределение скорости по сечению канала мало отличается от ее распределения в плоской щели. Столб твэлов охлаждается водой, движущейся сверху вниз по кольцевому каналу с заданной скоростью.

2.2. Уравнения и краевые условия

Для исследования теплофизических процессов в ячейке реактора воспользуемся уравнением температуропроводности в многослойном стержне с объемным тепловыделением во втулочных твэлах и осредненным по сечению кольцевого зазора уравнением конвективного теплопереноса в охлаждающей воде.

Считаем, что столб твэлов расположен в канале аксиально симметрично и его ось совпадает с осью технологической трубы. Начало отсчета оси z находится в плоскости входа в канал, ось z направлена вниз по потоку воды.

Уравнение теплопроводности с объемным энерговыделением q_{Vi} в области расположения топлива имеет вид

$$c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{Vi}, \quad (1)$$

где T — температура, c_i , ρ_i , λ_i — теплоемкость, плотность и теплопроводность соответственно, индексом i обозначены теплофизические параметры алюминия ($i = 0$) (сердечника, оболочки и трубы), тепловыделяющего слоя ($i = 1$), графитовой втулки ($i = 2$): $q_{V0} \equiv 0$, $q_{V1} = q_{V1}(z)$, $q_{V2} \equiv 0$.

Закон изменения величины q_{V1} зададим в виде [1, 2]

$$q_{V1} = q_{V \max} \cos(\pi(z - H_e/2)/H_e) f(z), \quad (2)$$

где функция $f(z)$ равна единице в области тепловыделяющего слоя и принимает нулевое значение в торцевых областях алюминиевых оболочек и в алюминиевых

вставках. По сечению втулочного твэла распределение энергии считаем однородным. Величину $q_{V \max}$ вычисляем из условия, что интеграл от q_V по всему объему твэлов в столбе равен заданной мощности канала W .

Эффективное значение экстраполированной высоты столба H_e определим из условия $k_H = \langle q_V \rangle / q_{V \max}$, где k_H — заданный коэффициент, характеризующий неравномерность энерговыделения по высоте рассматриваемого столба твэлов; $\langle q_V \rangle$ — средняя по высоте твэлов объемная мощность энерговыделения.

Уравнение (1) дополняем краевыми условиями, характеризующими значения температур T_i в начальный момент времени $t = 0$, на поверхности $z = 0$, а также условиями теплообмена на контактирующих поверхностях элементов рассматриваемой ячейки реактора.

Начальные и граничные условия:

$$T \Big|_{t=0} = T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad T \Big|_{z=0} = T_0, \quad (3)$$

$$T \Big|_{r_0-0} = T \Big|_{r_0+0}, \quad \lambda_0 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_0-0} = \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_0+0}, \quad (4)$$

$$T \Big|_{r_1-0} = T \Big|_{r_1+0}, \quad \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_1-0} = \lambda_0 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_1+0}, \quad (5)$$

$$\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_2-0} = -\alpha_1 (T \Big|_{r_2} - T_B), \quad \lambda_0 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_3-0} = -\alpha_2 (T_B - T \Big|_{r_3-0}), \quad (6)$$

$$T \Big|_{r_4-0} = T \Big|_{r_4+0}, \quad \lambda_0 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_4-0} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_4+0}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_5} = 0. \quad (8)$$

Равенство (8) характеризует принятое условие адиабатичности на внешней поверхности графитовой втулки, остальные соотношения (4–7) описывают теплообмен на контактирующих поверхностях элементов рассматриваемой ячейки реактора.

Температуру охлаждающей воды определяем из решения осредненного по сечению кольцевого канала уравнения конвективного теплопереноса

$$c_w \rho_w \left(\frac{\partial T_w}{\partial t} + v \frac{\partial T_w}{\partial z} \right) = \frac{2\alpha_1 r_2}{r_3^2 - r_2^2} \left(T \Big|_{r_2} - T_w \right) - \frac{2\alpha_2 r_3}{r_3^2 - r_2^2} \left(T_w - T \Big|_{r_3} \right), \quad (9)$$

где c_w , ρ_w , λ_w — теплоемкость, плотность и теплопроводность воды, v — средняя скорость ее течения в кольцевом канале, r_3 , r_2 — внешний и внутренний радиусы кольцевого водоохлаждаемого канала, α_1 , α_2 — коэффициенты теплоотдачи от столба твэлов к воде и от воды к технологической трубе соответственно, значения которых при $(r_3 - r_2)/r_2 \ll 1$ с достаточной точностью можно считать равными и определить по формуле [3]

$$\alpha_1 \cong \alpha_2 = \left(1 - \frac{0,45}{2,4 + \text{Pr}} \right) \frac{(\xi/8) \text{RePr}}{1,07 - 12,7 \sqrt{\xi/8} (1 - \text{Pr}^{2/3})},$$

где $\xi = (1,82 \lg \text{Re} - 1,64)$, $\text{Pr} = \nu_w / a_w$ — число Прандтля, ν_w , a_w — кинематическая вязкость и температуропроводность воды соответственно, $\text{Re} = 2\delta_w v / \nu_w$ — число Рейнольдса, $\delta_w = r_3 - r_1$ — ширина водоохлаждаемого канала.

Условия теплообмена на торцевых поверхностях твэлов определяются их рельефом: наличием впадин на нижних и канавок на верхних торцах (рис. 2). В общем случае эти условия можно представить в виде закона Ньютона [1]

$$\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z_n=0} = \lambda_0 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z_n+0} = \alpha_n (T \Big|_{z_n+0} - T \Big|_{z_n=0}). \quad (10)$$

Здесь $\alpha_n = \lambda_w / \delta_n$ — коэффициент теплопередачи от торца твэла, имеющего впадину глубиной δ_n , к алюминиевой вставке (рис. 2, а), λ_w — теплопроводность среды, заполняющей торцевые углубления (вода при $T < T_n$ и пар при $T \geq T_n$), $\alpha_n = \lambda_w / \delta(r)$ — в зоне контактов нижнего (с впадиной) и верхнего (с кольцевой канавкой) торцов твэлов, где $\delta = \delta_n$ при $0 \leq r \leq r_k$; $\delta = \delta_n + \delta_k$ при $r_k \leq r \leq r_0$. Здесь δ_k — глубина канавки, r_k — координата внутренней стенки канавки (рис. 2, б).

В области непосредственного контакта торцевых поверхностей ($r_0 \leq r \leq r_1$) коэффициент теплообмена α_n определим по формуле Шлыкова–Ганина [4], учитывающей контактное термическое сопротивление соприкасающихся поверхностей, в виде

$$\alpha_n = 8 \cdot 10^3 \lambda_1 \left(\frac{P_\Sigma^n K}{3\sigma_w} \right)^{0,8} + \frac{\lambda_c}{2(h_{k1} + h_{k2})}, \quad (11)$$

где $P_\Sigma^n = P_{Bx} + g \sum_{i=1}^n m_i / S_i$ — давление, равное сумме давления на входе и давления, оказываемого весом верхних n блочков, где S_i — площадь контакта, m_i — масса i -го блочка, g — ускорение свободного падения, σ_B — предел прочности материала оболочки (алюминия), h_{k1}, h_{k2} — средние высоты микронеровностей указанных поверхностей, $k = 1$ при $h_{k1} + h_{k2} \geq 30$ мкм. В рассматриваемой задаче $h_{k1} \approx 200$ мкм, следовательно $k = 1$. В случае плоских торцов выражение для α_n имеет вид (11) для всей поверхности контакта блочков ($0 \leq r \leq r_1$).

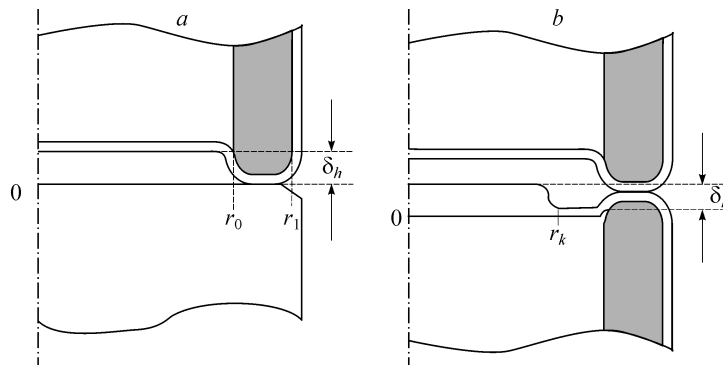


Рис. 2. Схема к постановке граничных условий на торцевых поверхностях твэлов.

Сформулированная система уравнений представляет собой замкнутую математическую модель теплофизических процессов в канале уран-графитового реактора с дисперсионными твэлами.

На основе предложенной математической модели разработаны численный алгоритм и компьютерная программа. Система разностных уравнений, аппроксимирующих исходную краевую задачу, строилась с использованием неявной разностной схемы при аппроксимации балансных соотношений, получаемых интегрированием уравнений переноса, с учетом краевых условий [6]. При получении решений соответствующей алгебраической системы уравнений для каждого момента времени использовались методы встречной прогонки, простой итерации и блочной верхней релаксации. Условия, необходимые для устойчивости решения разностной схемы и сходимости итерационного процесса, устанавливались на основе свойств монотонных матриц [7, 8]. Сравнение результатов расчета с опытным значением температуры воды на выходе из канала показало хорошее их согласование (погрешность составляет менее 1 %)

Численные расчеты проведены при следующих исходных данных: $r_0 = 13 \cdot 10^{-3}$ м, $r_1 = 18,5 \cdot 10^{-3}$ м, $r_2 = 20 \cdot 10^{-3}$ м, $r_3 = 21,25 \cdot 10^{-3}$ м, $r_4 = 23,65 \cdot 10^{-3}$ м, $r_5 = 33,9 \cdot 10^{-3}$ м, $\delta_w = 1,25 \cdot 10^{-3}$ м, $\lambda_w = 0,675$ Вт/(м·К), $c_w = 4356$ Дж/(кг·К), $\rho_w = 986$ кг/м³, $\delta_h = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\delta_k = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, $r_k = 11,5 \cdot 10^{-3}$ м, $P_{\text{вх}} = 3,88$ МПа, $v = 8,5$ м/с, $W = 760$ кВт, $k_n = 0,73$.

Значения теплофизических параметров Al, UO₂ и графита задавались согласно [3, 4, 5].

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

С помощью разработанной компьютерной программы были проведены вычислительные эксперименты. Некоторые результаты этих экспериментов представлены на рис. 3–6, они характеризуют распределение температурных полей и тепловых потоков в ячейке промышленного реактора в установившемся режиме его работы.

Рис. 3 иллюстрирует характер изменения удельного потока тепла, отводимого от боковой поверхности столба твэлов, состоящего из 70 блокков высотой $102,5 \cdot 10^{-3}$ м, из которых 19 являются алюминиевыми вставками. Немонотонный характер изменения этой величины отражает влияние алюминиевых вставок, в объеме которых принималось $q_{v2} \equiv 0$, на распределение энерговыделения в столбе твэлов.

Изменения температуры охлаждающей воды, торцевых закруглений, боковых поверхностей твэлов и середины их торцов по высоте столба представлены на рис. 4. Нетрудно видеть, что температура охлаждающей воды монотонно растет (с незначительными по амплитуде колебаниями) вдоль канала, достигая на выходе из него значения, близкого к штатному, равного 180 °С. Значения же температур в указанных выше точках твэлов в соответствии с распределением энерговыделения в столбе имеют немонотонный характер, резко падая в областях алюминиевых вставок. Огибающие максимальных значений этих величин вначале

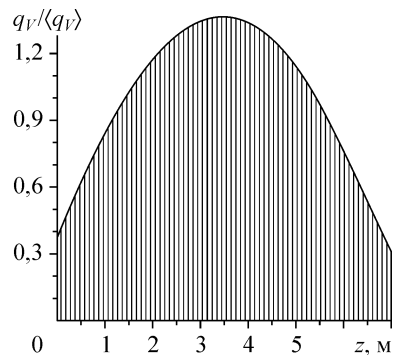


Рис. 3. Изменение по оси Z удельного потока тепла q , отводимого от боковой поверхности столба твэлов.

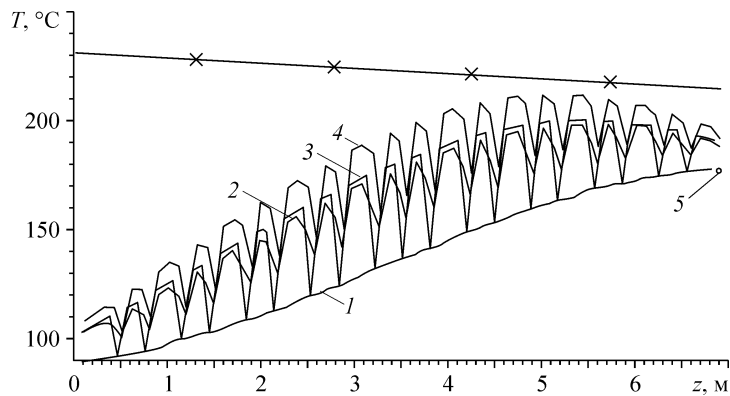


Рис. 4. Изменение температуры вдоль оси Z.

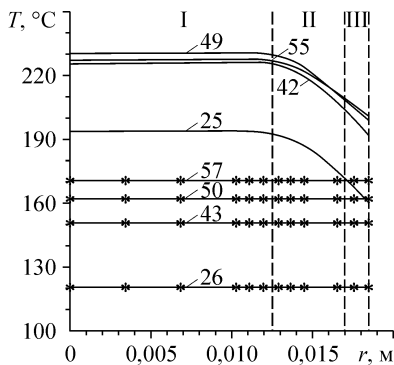
1 — воды, 2 — на закруглениях твэлов и вставок, 3 — на боковых поверхностях твэлов и алюминиевых вставок, 4 — на середине их торцов; крестиками обозначена температура насыщения воды, 5 — опытное значение температуры воды на выходе из канала (по данным авторов).

монотонно растут, а затем, начиная примерно с блокка № 49 (или с 5 м) от входа в канал, монотонно падают. Наиболее разогретыми здесь являются центры торцов твэлов. При этом их температура не превышает значения температуры насыщения, следовательно вскипания воды в области контакта торцов не происходит.

Распределения температур по сечениям твэлов и алюминиевых вставок, проходящих на одинаковом расстоянии от их торцов (через середину блокков), представлены на рис. 5.

Как видно из графика, температура твэлов в центральной зоне, соответствующей расположению внутреннего алюминиевого стержня, имеет однородный характер распределения (область плато). На периферии же (в области тепловыделяющего слоя) она монотонно убывает в сторону охлаждаемой боковой поверхности. Такой характер изменения температуры связан с тем, что тепло, выделяющееся во втулочном твэле отводится как внутрь блокка, так и на периферию, к охлаждающей воде. В виду высокой теплопроводности сердечника это тепло к моменту установления стационарного режима распределяется однородно по сечению сердечника. Разогрев алюминиевых вставок осуществляется за счет осевых потоков тепла через контактирующие торцевые поверхности блокков, что при высокой теплопроводности вставки обуславливает равномерное распределение температуры по всему ее сечению.

Исследовалось влияние торцевых впадин и канавок на температуру прилегающих слоев твэлов и вставок. Как следует из приведенных расчетов, в местах контакта торцов двух соседних твэлов это влияние незначительно (различие по



температурам составляет 0,1–0,2 °C). Если твэл контактирует с алюминиевой вставкой, то значения температур соседних торцевых поверхностей существенно зависит от их морфологии и положения в столбе (рис. 6). Так, например, разница между температурами

Рис. 5. Распределение температуры по сечению блокков.

I — область внутреннего (алюминиевого) стержня, II — область тепловыделяющего слоя, III — область оболочки; цифры над кривыми означают номер блокка сверху вниз; крестики — алюминиевые вставки.

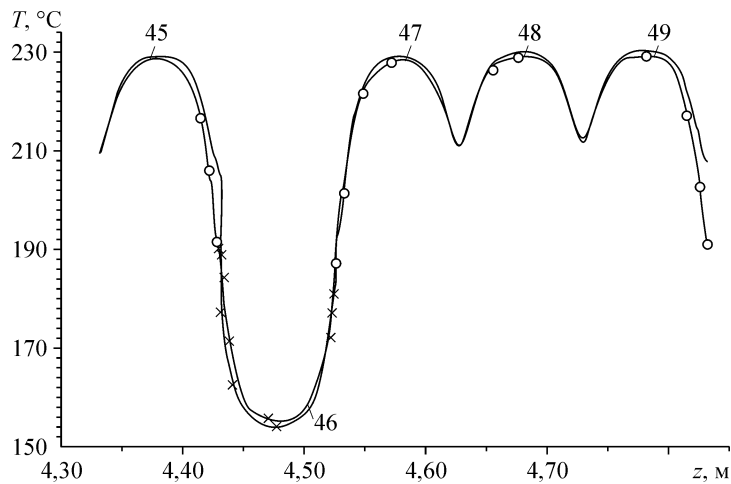


Рис. 6. Изменение температуры в центре твэлов №№ 45–49 по оси Z.

нижнего торца вставки № 46 и верхнего торца твэла № 47 в их центральных точках составляет 8,6 °C для гладкой поверхности твэла и 9,6 °C при наличии кольцевой канавки глубиной 0,2 мм. Температура верхнего торца твэла № 47 (с канавкой) оказывается более высокой (на 3,6–4,6 °C в центральной области и 6,8–4,8 °C в области канавки) по сравнению с тем же твэлом, но без канавки. В области контакта нижнего торца твэла 49, имеющего впадину глубиной 0,5 мм, с верхним торцом вставки № 50 различие по температуре равно 14,2 °C, а для гладких поверхностей — 8,6 °C.

При этом нижний торец твэла № 49 (с впадиной) имеет более высокую температуру, чем твэл с глухим торцом (на 17,2 °C в центре). На периферии (в области тепловыделяющего слоя), где торцевые поверхности имеют непосредственный контакт, эти различия сглаживаются.

ВЫВОДЫ

1. Характерной особенностью изменения температурных полей в твэлах является близкое к однородному распределение температуры по сечению алюминиевого сердечника с последующим монотонным падением ее в области тепловыделяющего слоя.

2. Температура охлаждающей воды монотонно растет вдоль канала и на выходе достигает близкого к штатному значения 180 °C, что существенно ниже локального значения температуры насыщения.

3. На боковых поверхностях, закруглениях и торцах изменение температуры вдоль оси z имеет немонотонный характер в соответствии с законом распределения энерговыделения, учитывающего алюминиевые доньшки и вставки. Максимальные значения температуры достигаются в районе 48–49 блоков, не превосходя при этом локальных значений температуры насыщения.

4. Наличие или отсутствие впадин и канавок на торцах твэлов существенно сказывается на значениях их температур лишь в областях контакта торцов твэла и вставки, где разница между температурами составляет 10–14 °C. В областях контакта торцов блоков с твэлами это влияние незначительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. — М.: Атомиздат, 1975. — 408 с.
2. Нигматулин И.Н., Нигматулин Б.И. Ядерные энергетические установки. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 186 с.
3. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 472 с.
4. Шолохов А.А., Засорин Н.П., Минашин В.Е. и др. Определение температуры в твэлах ядерного реактора. — М.: Атомиздат, 1978. — 323 с.
5. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. — М.: Металлургия, 1989. — 364 с.
6. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1989. — 616 с.
7. Ильин В.П., Кузнецов Ю.И. Трехдиагональные матрицы и их приложения. — М.: Наука, 1985. — 207 с.
8. Попов В.Н. Сходимость разностной схемы для двумерного квазилинейного уравнения параболического типа // Вариационно-разностные методы в задачах численного анализа. — Новосибирск. ВЦ СО РАН СССР. — 1991. — С. 124–133.

Статья поступила в редакцию 8 августа 2005 г.