

РЗ-2004-140

Ро Ду Мин

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
В КАПСУЛЕ ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
ХОЛОДНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НЕЙТРОНОВ

Ро Ду Мин

P3-2004-140

Расчет распределения температуры в капсуле для облучения материалов холодного замедлителя нейтронов

Приведены методика и результат численного расчета распределения температур в капсуле малого объема в форме сферического сегмента, заполненной тепловыделяющим веществом. Варьируемый по областям разностный метод позволил точно определить незначительное снижение температуры вблизи границы вещества с установленной в объеме термопарой, вызванное отличием теплопроводности материалов термопары и наполняющего вещества.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Ro Du Min

P3-2004-140

Calculation of Temperature Distribution in Capsule for Neutron Exposure of the Cold Moderator Materials

Methods and results of the numerical calculation of temperature distribution in the spherical segmented small capsule filled with heat-generating substance are presented. Variable finite-difference method allowed one to evaluate a small drop of temperature near the boundary between the filling substance and the thermocouple installed inside the capsule, which originates from the difference in thermal conductivity.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с программой разработки эффективных и надежных холодных замедлителей нейтронов, осуществляемой в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка, изучались радиационные эффекты в различных замедляющих водородосодержащих материалах при температурах $15 \div 50$ К. Работы проводились на третьем канале реактора ИБР-2 на специально созданной установке УРАМ-2 [1–4]. Радиационные эффекты в исследуемой области температур сильно температурно-зависимы, и поэтому температура облучения должна быть известна, по крайней мере, с точностью не хуже одного градуса. С этой целью в дополнение к термопарам на стенках полусферической капсулы для образцов диаметром 30 мм одна термопара была установлена внутри капсулы. Однако ввиду низкой теплопроводности исследуемых материалов (твердый метан, гидраты метана, лед воды, ароматические углеводороды) наличие термопары приводит к локальному снижению температуры. Эта поправка при анализе экспериментов УРАМ-2 оценивалась приближенно, аналитически. В данной работе распределение температур в капсуле рассчитано численно.

Решены стационарные дифференциальные уравнения теплопроводности для реальной 2D-геометрии полусферической капсулы явным разностным методом. При этом предположено, что между областями различных материалов существует гипотетический граничный слой, теплофизические свойства которого усреднены по свойствам граничащих материалов. В результате получены данные о распределении температур, позволяющие уточнить поправку на показание внутренней термопары капсулы УРАМ-2.

1. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Геометрическая модель рассматриваемой капсулы показана на рис. 1. Как видно на рис. 1, *a*, капсула состоит из вещества замедлителя нейтронов (водородосодержащее вещество) и термопары; в свою очередь, термопара состоит из тонкой металлической цилиндрической оболочки и заполнителя (окись магния). При облучении нейтронами в капсуле выделяется тепло, интенсивность которого зависит от материала.

Теплопередачи через верхнюю сторону капсулы, которая является адиабатической границей, не существует. Сферическая сторона охлаждается снаружи гелием постоянной температуры и потому является границей постоянной температуры.

В этом случае распределение температуры по объему капсулы должно быть осесимметричным (см. рис. 1, б).

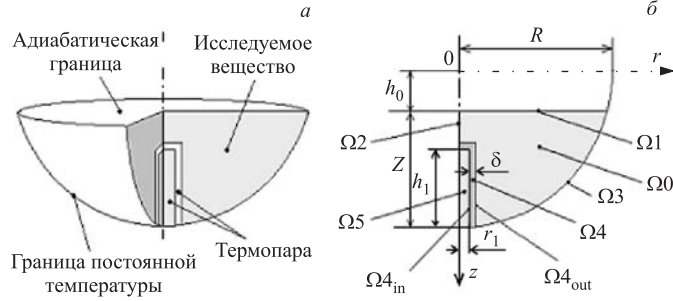


Рис. 1. Геометрическая модель рассматриваемой капсулы [1]: а — модель капсулы; б — вертикальное сечение капсулы

На рис. 1, б $\Omega 1, \Omega 2$ являются адиабатическими границами, а $\Omega 3$ — границей постоянной температуры. $\Omega 0, \Omega 4$ и $\Omega 5$ есть тепловыделяющие области, где плотности тепловыделения равняются соответственно $q_{v,0}, q_{v,4}$ и $q_{v,5}$ и теплопроводности — соответственно λ_0, λ_4 и λ_5 . $\Omega 4_{in}$ и $\Omega 4_{out}$ — соответственно внутренняя и внешняя границы области $\Omega 4$.

Если предположить, что для каждой области капсулы теплопроводность постоянна и изотропна, то можно написать систему дифференциальных уравнений, которая удовлетворит распределению температуры в виде сферического сегмента, следующим образом:

$$\begin{cases}
 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_{v,0}}{\lambda_0} = 0, & (r, z) \in \Omega 0, \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_{v,4}}{\lambda_4} = 0, & (r, z) \in \Omega 4, \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_{v,5}}{\lambda_5} = 0, & (r, z) \in \Omega 5, \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\bar{q}_{v,(0-4)}}{\bar{\lambda}_{(0-4)}} = 0, & (r, z) \in \Omega 4_{out}, \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\bar{q}_{v,(4-5)}}{\bar{\lambda}_{(4-5)}} = 0, & (r, z) \in \Omega 4_{in}, \\
 \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{\Omega 1} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\Omega 2} = 0, \quad T|_{\Omega 3} = T_0.
 \end{cases} \quad (1.1)$$

В этих уравнениях

$$\begin{aligned}
\Omega 1 &= (r, z), & 0 \leq r \leq \sqrt{R^2 - h_0^2}, z = h_0, \\
\Omega 2 &= (r, z), & r = 0, h_0 \leq z \leq R, \\
\Omega 3 &= (r, z), & 0 \leq r \leq \sqrt{R^2 - h_0^2}, z = \sqrt{R^2 - r^2}, \\
\Omega 4_{\text{in}} &= (r, z), & \begin{cases} r = r_1, R - h_1 \leq z \leq R, \\ 0 \leq r \leq r_1, z = R - h_1, \end{cases} \\
\Omega 4_{\text{out}} &= (r, z), & \begin{cases} r = r_1 + \delta, R - h_1 - \delta \leq z \leq R, \\ 0 \leq r \leq r_1 + \delta, z = R - h_1 - \delta, \end{cases}
\end{aligned}$$

и $\bar{q}_{v,(0-4)}, \bar{\lambda}_{v,(0-4)}$ являются соответственно эквивалентной плотностью тепловыделения и эквивалентной теплопроводностью на границе между областями $\Omega 0$ и $\Omega 4$, и $\bar{q}_{v,(4-5)}, \bar{\lambda}_{v,(0-4)}$ — на границе между областями $\Omega 4$ и $\Omega 5$.

Для простоты задачи мы считали, что между областями различных материалов существует некий гипотетический граничный слой, который имеет эквивалентные теплофизические свойства, равные среднему значению от свойств материалов, составляющих границу.

2. РАЗНОСТНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для уменьшения числа узлов в решении уравнения (1.1) разностным методом шаг пространственной решетки варьируется по областям, как на рис. 2. При этом область капсулы делится на восемь подобластей с отличными друг от друга шагами узлов.

2.1. Внутренние узлы. В этих узлах (1–8 на рис. 2) дифференциальные уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = -\frac{q_v}{\lambda}, \quad (2.1)$$

для которого можно написать разностное уравнение [2]:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{r_m} \frac{r_{m+1/2}(T_{m+1}^n - T_m^n) - r_{m-1/2}(T_m^n - T_{m-1}^n)}{h_r^2} + \\
+ \frac{T_m^{n+1} - 2T_m^n + T_m^{n-1}}{h_z^2} = -\frac{q_v}{\lambda}, \quad (2.2)
\end{aligned}$$

здесь T_m^n — температура в узле (m, n) , $r_{m\pm 1/2}$ — радиальная координата точки между узлами m и $(m \pm 1)$. Преобразуя разностное уравнение (2.2),

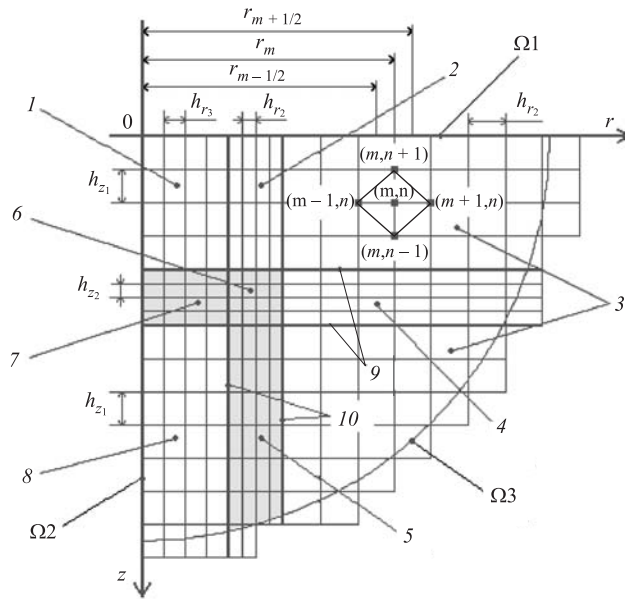


Рис. 2. Разностная схема для решения дифференциальных уравнений: $h_{r(i)}$ — i -я радиальная разность; $h_{z(i)}$ — i -я аксиальная разность; m, n — номера узлов на радиальном и аксиальном направлении; 1–8 — внутренние области; r_m — радиальная координата m -го узла; 9, 10 — внутренние границы на горизонтальной и вертикальной стороне; $\Omega 1$ – $\Omega 3$ — внешние границы

получим выражение

$$\frac{1}{h_z^2} T_m^{n-1} + \frac{r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} T_{m-1}^n - \left(\frac{r_{m+1/2}}{r_m h_r^2} + \frac{r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} + \frac{2}{h_z^2} \right) T_m^n + \frac{r_{m+1/2}}{r_m h_r^2} T_{m+1}^n + \frac{1}{h_z^2} T_m^{n+1} = -\frac{q_v}{\lambda}, \quad (2.3)$$

которое является общим разностным уравнением для неграничных областей.

В этом уравнении, если заменить последовательно величины h_r, h_z, q_v, λ величинами для соответственных областей, получаются соответственные разностные уравнения для всех восьми областей. В табл. 1 показаны величины h_r, h_z, q_v, λ для каждой области.

Как видно из уравнения (2.3) и табл. 1, все члены разностных уравнений для неграничных узлов имеют ненулевые коэффициенты.

Таблица 1. Величины h_r, h_z, q_v, λ для каждой области капсулы

Величина	Область							
	1	2	3	4	5	6	7	8
h_r	h_{r3}	h_{r2}	h_{r1}	h_{r1}	h_{r2}	h_{r2}	h_{r3}	h_{r3}
h_z	h_{z1}	h_{z1}	h_{z1}	h_{z2}	h_{z1}	h_{z2}	h_{z2}	h_{z1}
q_v	$q_{v,0}$	$q_{v,0}$	$q_{v,0}$	$q_{v,0}$	$q_{v,4}$	$q_{v,4}$	$q_{v,4}$	$q_{v,5}$
λ	λ_0	λ_0	λ_0	λ_0	λ_4	λ_4	λ_4	λ_5

2.2. Осевые границы (Ω_1, Ω_2). Осевые границы должны удовлетворять следующим граничным условиям:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{\Omega_1} = 0, \\ \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\Omega_2} = 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

Преобразуя эти условия в разностные уравнения, получим

$$\begin{cases} T_{m+1}^n = T_{m-1}^n, & m, n \in \Omega_2, \\ T_m^{n+1} = T_m^{n-1}, & m, n \in \Omega_1. \end{cases} \quad (2.5)$$

Заменяв разностные уравнения (2.5) на общие разностные уравнения (2.3), получим

$$\begin{cases} \frac{1}{h_z^2} T_m^{n-1} - \left(\frac{r_{m+1/2}}{r_m h_r^2} + \frac{r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} + \frac{2}{h_z^2} \right) T_m^n + \\ \quad + \left(\frac{r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} + \frac{r_{m+1/2}}{r_m h_r^2} \right) T_{m+1}^n + \frac{1}{h_z^2} T_m^{n+1} = -\frac{q_v}{\lambda}, \\ \frac{r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} T_{m-1}^n - \left(\frac{r_{m+1/2}}{r_m h_r^2} + \frac{r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} + \frac{2}{h_z^2} \right) T_m^n + \\ \quad + \frac{r_{m+1/2}}{r_m h_r^2} T_{m+1}^n + \frac{2}{h_z^2} T_m^{n+1} = -\frac{q_v}{\lambda}, \end{cases} \quad (2.6)$$

каждое из которых является общим разностным уравнением соответственно для областей Ω_1 и Ω_2 .

В начале координат удовлетворяются оба уравнения (2.5), и разностное уравнение имеет вид [2]

$$-\left(\frac{r_{m+1/2}}{r_m h_r^2} + \frac{r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} + \frac{2}{h_z^2} \right) T_m^n + \left(\frac{r_{m+1/2}}{r_m h_r^2} + \frac{r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} \right) T_{m+1}^n + \frac{2}{h_z^2} T_m^{n+1} = -\frac{q_v}{\lambda}. \quad (2.7)$$

2.3. Внутренние границы между материалами. На этих границах (см. 9, 10 на рис. 2) разности, противостоящие относительно рассматриваемой точки, не равны (см. рис. 3).

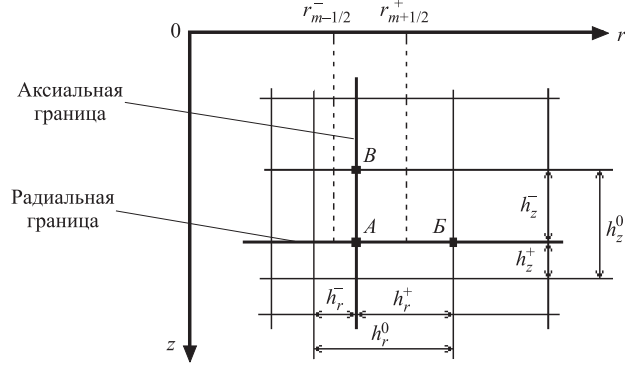


Рис. 3. Разностная схема на внутренней границе между материалами

В самом обычном случае, в котором обе разности на радиальном и аксиальном направлении различны (точка *A* на рис. 3), общее разностное уравнение можно записать в виде [2]

$$\frac{2r_{m+1/2}^+}{r_m h_r^+ h_r^0} T_{m+1}^n - \frac{2(h_r^- r_{m+1/2}^+ + h_r^+ r_{m-1/2}^-)}{r_m h_r^+ h_r^- h_r^0} T_m^n + \frac{2r_{m-1/2}^-}{r_m h_r^- h_r^0} T_{m-1}^n + \frac{2}{h_z^+ h_z^0} T_m^{n+1} - \frac{2}{h_z^+ h_z^-} T_m^n + \frac{2}{h_z^- h_z^0} T_m^{n-1} = -\frac{\bar{q}_v}{\lambda}, \quad (2.8)$$

здесь

$$\bar{q}_v = \frac{q_{v,1} h_z^- h_r^+ + q_{v,2} h_r^+ h_z^+ + q_{v,3} h_r^- h_z^+ + q_{v,4} h_r^- h_z^-}{h_r^0 h_z^0},$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 h_z^- h_r^+ + \lambda_2 h_r^+ h_z^+ + \lambda_3 h_r^- h_z^+ + \lambda_4 h_r^- h_z^-}{h_r^0 h_z^0}.$$

Для узлов на радиальной границе, в которой только разности на аксиальном направлении различны (точка *B* на рис. 3), общее разностное уравнение описывается в виде [2]

$$\frac{r_{m+1/2}}{r_m h_r^2} T_{m+1}^n - \frac{r_{m+1/2} + r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} T_m^n + \frac{r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} T_{m-1}^n + \frac{2}{h_z^+ h_z^0} T_m^{n+1} - \frac{2}{h_z^+ h_z^-} T_m^n + \frac{2}{h_z^- h_z^0} T_m^{n-1} = -\frac{\bar{q}_v}{\lambda},$$

при этом

$$\bar{q}_v = \frac{q_{v,1}h_z^- + q_{v,2}h_z^+}{h_z^- + h_z^+}, \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda_1h_z^- + \lambda_2h_z^+}{h_z^- + h_z^+}.$$

Для узлов на аксиальной границе, в которой только разности на радиальном направлении различны (точка B на рис. 3), общее разностное уравнение имеет вид [2]

$$\begin{aligned} \frac{2r_{m+1/2}^+}{r_m h_r^+ h_r^0} T_{m+1}^n - \frac{2(h_r^- r_{m+1/2} + h_r^+ r_{m-1/2}^-)}{r_m h_r^+ h_r^- h_r^0} T_m^n + \\ \frac{2r_{m-1/2}^-}{r_m h_r^- h_r^0} T_{m-1}^n + \frac{1}{h_z^2} T_m^{n+1} - \frac{2}{h_z^2} T_m^n + \frac{1}{h_z^2} T_m^{n-1} = -\frac{\bar{q}_v}{\lambda} \end{aligned}$$

при этом

$$\bar{q}_v = \frac{q_{v,1}h_r^+ + q_{v,4}h_r^-}{h_r^- + h_r^+}, \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda_1h_r^+ + \lambda_4h_r^-}{h_r^- + h_r^+}.$$

2.4. Внутренние узлы около внешней границы (Ω_3). Поскольку внешняя граница Ω_3 (рис. 2) имеет круговую симметрию, внутренние узлы имеют три вида решеток (см. рис. 4).

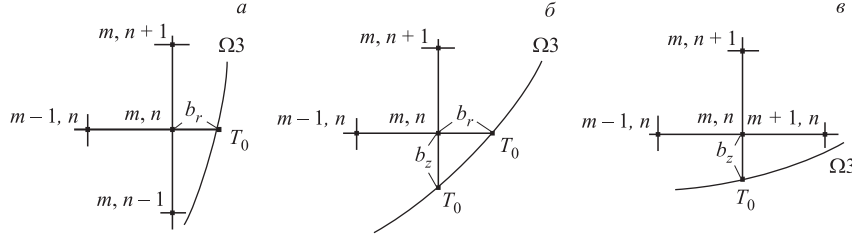


Рис. 4. Три вида решеток около внешней границы: m, n — номера узлов на радиальном и аксиальном направлении; b_r — радиальная дистанция между узлами около границы и на границе; b_z — аксиальная дистанция между узлами около границы и на границе; Ω_3 — внешняя граница

Для узлов, представленных на рис. 4, a , на которых $T_{m+1}^n = T_0$, общее разностное уравнение можно записать в следующем виде [5]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{h_z^2} T_m^{n-1} + \frac{2r_{m-1/2}}{r_m h_r (h_r + b_r)} T_{m-1}^n - 2 \left[\frac{h_r (r_m + b_r/2) + b_r r_{m-1/2}}{r_m h_r b_r (h_r + b_r)} + \frac{1}{h_z^2} \right] T_m^n + \\ + \frac{1}{h_z^2} T_m^{n+1} = -\frac{q_v}{\lambda} - \frac{2(r_m + b_r/2)}{r_m b_r (h_r + b_r)} T_0. \end{aligned}$$

Для узлов, представленных на рис. 4, б, на которых $T_{m+1}^n = T_0$ и $T_m^{n-1} = T_0$, общее разностное уравнение можно описывать так [5]:

$$\begin{aligned} \frac{2r_{m-1/2}}{r_m h_z (h_z + b_z)} T_{m-1}^n - 2 \left[\frac{h_r (r_m + b_r/2) + b_r r_{m-1/2}}{r_m h_r b_r (h_r + b_r)} + \frac{1}{h_z b_z} \right] T_m^n + \\ + \frac{2}{b_z (h_z + b_z)} T_m^{n+1} = -\frac{q_v}{\lambda} - \left[\frac{2(r_m + b_r/2)}{r_m b_r (h_r + b_r)} + \frac{2}{h_z (h_z + b_z)} \right] T_0. \end{aligned}$$

Для узлов на рис. 4, в, на которых $T_m^{n-1} = T_0$, общее разностное уравнение можно описывать в следующем виде [3]:

$$\begin{aligned} \frac{r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} T_{m-1}^n - \left(\frac{r_{m+1/2} + r_{m-1/2}}{r_m h_r^2} + \frac{2}{h_z b_z} \right) T_m^n + \frac{r_{m+1/2}}{r_m h_r^2} T_{m+1}^n + \\ + \frac{2}{b_z (h_z + b_z)} T_m^{n+1} = -\frac{q_v}{\lambda} - \frac{2}{h_z (h_z + b_z)} T_0. \end{aligned}$$

Таким образом, получены общие разностные уравнения для всех рассматриваемых областей капсулы. Используя вышерассмотренные общие разностные уравнения, можно записать разностные уравнения для каждого узла на площади сечения капсулы, и в результате получается система алгебраических уравнений первого порядка:

$$[M] [T] = [S], \quad (2.9)$$

где $[M]$ — матрица коэффициентов порядка N , элементы которой определяются по коэффициентам соответствующих разностных уравнений:

$$[M] = \begin{pmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & 0 & \dots & A_{1,i} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} & 0 & \dots & A_{2,i+1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_{3,2} & A_{3,3} & A_{3,4} & 0 & \dots & A_{3,i+2} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & A_{4,3} & A_{4,4} & A_{4,5} & 0 & \dots & A_{4,i+4} & \dots & 0 \\ A_{i,1} & \vdots & 0 & A_{5,4} & A_{5,5} & A_{5,6} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & A_{i+1,2} & \vdots & 0 & A_{6,5} & A_{6,6} & A_{6,7} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & A_{i+2,3} & \vdots & 0 & A_{7,6} & A_{7,7} & A_{7,8} & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & A_{i+3,4} & \vdots & 0 & A_{8,7} & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & A_{N-1,N-1} A_{N-1,N} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & A_{N,N-1} & A_{N,N} \end{pmatrix},$$

здесь N — число узлов; i — число радиальных узлов на границе Ω_1 .

Матрица $[M]$ является диагональной матрицей, которая имеет лентообразную структуру.

Поскольку внешняя граница рассматриваемой области имеет круговую симметрию

$$r^2 + z^2 = R^2,$$

число радиальных узлов i уменьшается с увеличением номера аксиального узла. Поэтому толщина ленты матрицы $[M]$ уменьшается с увеличением номера N .

В уравнении (2.9) $[T]$, $[S]$ — N -мерные векторы с проекциями соответственно неизвестных температур и постоянных коэффициентов:

$$[T] = \begin{pmatrix} T_1(m, n) \\ T_2(m, n) \\ \dots \\ T_N(m, n) \end{pmatrix}, \quad [S] = \begin{pmatrix} f_1(q_v/\lambda) \\ f_2(q_v/\lambda) \\ \dots \\ f_N(q_v/\lambda) \end{pmatrix}.$$

Решив систему алгебраических уравнений (2.9), последовательно можно получить распределение температуры в рассматриваемой капсуле.

3. РЕЗУЛЬТАТ ВЫЧИСЛЕНИЯ

На основе вышерассмотренного метода получено распределение температуры капсулы. Теплофизические свойства материалов и геометрические размеры капсулы, принятые для вычисления, приведены в табл. 2 [5].

Таблица 2. Теплофизические свойства материалов и геометрические размеры капсулы, принятые для вычисления

Радиус шара капсулы	15 мм
Высота замедлителя в капсуле	12 мм
Внутренний радиус корпуса термопары	0,75 мм
Внутренняя высота корпуса термопары	8 мм
Толщина корпуса термопары	0,1 мм
Плотность тепловыделения замедлителя	0,3 Вт/см ³
Теплопроводность замедлителя	0,3 Вт/м·К
Плотность тепловыделения корпуса термопары	0,02 Вт/см ³
Теплопроводность корпуса термопары	3 Вт/м·К
Плотность тепловыделения заполнителя термопары	0,08 Вт/см ³
Теплопроводность заполнителя термопары	0,1 Вт/м·К
Температура на внешней границе капсулы	23 °С

Для того чтобы найти самый лучший вариант разностной решетки, который дает результат с достаточной точностью, расчет проводится при различных разностях.

Таблица 3. Изменение температуры в зависимости от шагов решетки

$h_r^{\Omega 5} = 0,125$ мм,	$h_r^{\Omega 4}$, мм	0,050	0,045	0,040	0,035	0,030	0,025	0,020
$h_r^{\Omega 0} = 0,5$ мм	T_{center} , °C	52,606	52,607	52,607	52,608	52,608	52,608	52,608
$h_r^{\Omega 4} = 0,035$ мм,	$h_r^{\Omega 5}$, мм	1,30	1,10	0,90	0,70	0,50	0,30	0,10
$h_r^{\Omega 0} = 0,5$ мм	T_{center} , °C	53,115	52,844	52,709	52,633	52,606	52,606	52,606
$h_r^{\Omega 5} = 0,125$ мм,	$h_r^{\Omega 5}$, мм	0,225	0,200	0,175	0,150	0,125	0,100	0,0975
$h_r^{\Omega 4} = 0,035$ мм	T_{center} , °C	52,617	52,61	52,609	52,609	52,608	52,608	52,608

Изменение температуры в центре капсулы в зависимости от шагов решетки показано в табл. 3 и на рис. 5.

В табл. 3 $h_r^{\Omega 0}$ — радиальный шаг в области замедлителя, $h_r^{\Omega 4}$ — шаг в области корпуса термопары, $h_r^{\Omega 5}$ — радиальный шаг в области заполнителя термопары, T_{center} — температура замедлителя в центре капсулы.

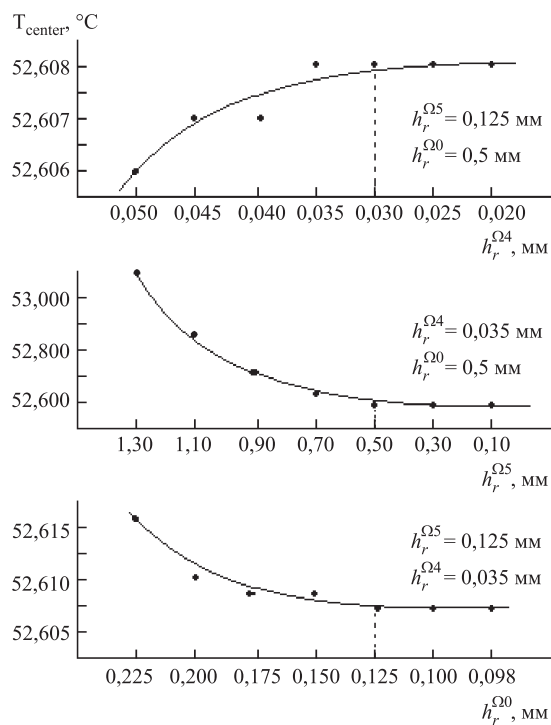


Рис. 5. Изменение температуры в зависимости от шагов решетки

Из табл. 3 и рис. 5 ясно, что для получения результата с точностью 10^{-3} нужно взять шаги $h_r^{\Omega_0} < 0,5$ мм, $h_r^{\Omega_4} < 0,035$ мм, $h_r^{\Omega_5} < 0,125$ мм.

Для завершающего расчета приняты следующие параметры решетки, представленные в табл. 4.

Таблица 4. Параметры решетки для завершения расчетов

Радиальный шаг в области заполнителя термопары $h_r^{\Omega_5}$	0,125 мм
Шаг в области корпуса термопары $h_r^{\Omega_4}$	0,033 мм
Радиальный шаг в области замедлителя $h_r^{\Omega_0}$	0,5 мм
Число аксиальных узлов	25
Число радиальных узлов	37
Общее число узлов	757

Результаты вычисления показаны на рис. 6 и в табл. 5.

Для лучшей видимости распределения температуры вблизи термопары температура приведена как функция номера узла. Как видно из графика на рис. 6, вблизи корпуса термопары ($m = 6 \div 9, n = 8 \div 11$) появляется небольшое снижение температуры из-за относительно высокой теплопроводности материала корпуса термопары. Теплопроводность материала корпуса термопары составляет 3 Вт/м/К, что гораздо больше теплопроводности материалов замедлителя нейтронов и заполнителя (0,3 ÷ 0,1 Вт/м/К). Этого достаточно для того, чтобы исказить вид распределения температуры.

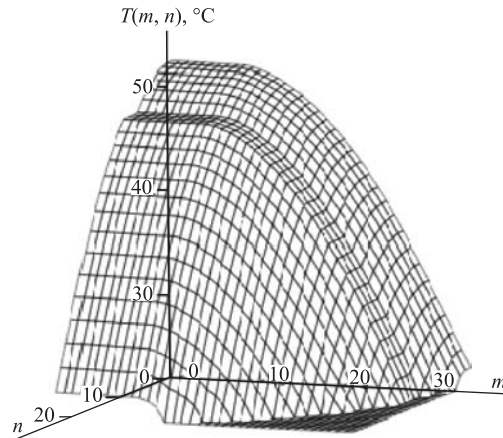


Рис. 6. Распределение температуры по разностным узлам: $T(m, n)$ — температура на узле (m, n) ; m — номер радиального узла; n — номер аксиального узла

Таблица 5. Распределение температуры по разностным узлам, °С

n	m																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	52.608	52.603	52.596	52.585	52.569	52.549	52.525	52.451	52.502	52.355	52.134	51.841	51.476	51.038	50.527	49.944	49.288	48.56		
2	52.539	52.535	52.528	52.516	52.501	52.481	52.457	52.442	52.434	52.287	52.066	51.775	51.411	50.972	50.461	49.878	49.222	48.494		
3	52.334	52.329	52.322	52.311	52.296	52.276	52.252	52.245	52.237	52.23	52.084	51.866	51.575	51.211	50.774	50.263	49.68	49.024	48.295	
4	51.989	51.985	51.978	51.967	51.952	51.933	51.909	51.895	51.887	51.745	51.53	51.241	50.879	50.444	49.934	49.351	48.694	47.965		
5	51.5	51.496	51.49	51.479	51.465	51.447	51.425	51.418	51.411	51.404	51.267	51.058	50.775	50.416	49.982	49.474	48.891	48.234	47.503	
6	50.858	50.854	50.849	50.84	50.827	50.811	50.792	50.786	50.779	50.773	50.65	50.451	50.175	49.822	49.391	48.884	48.301	47.643	46.91	
7	50.042	50.04	50.036	50.029	50.02	50.009	49.995	49.991	49.986	49.981	49.889	49.71	49.445	49.098	48.671	48.165	47.582	46.923	46.189	
8	49.013	49.012	49.01	49.007	49.004	49.001	48.998	48.997	48.997	48.996	48.988	48.839	48.589	48.248	47.824	47.32	46.736	46.076	45.339	
9	48.953	48.951	48.95	48.947	48.944	48.94	48.937	48.937	48.936	48.936	48.931	48.784	48.533	48.193	47.77	47.265	46.682	46.021	45.284	
10	48.892	48.891	48.889	48.887	48.883	48.88	48.877	48.876	48.875	48.875	48.873	48.727	48.478	48.138	47.715	47.21	46.627	45.966	45.229	
11	48.832	48.831	48.829	48.827	48.823	48.82	48.816	48.815	48.814	48.814	48.815	48.671	48.422	48.083	47.659	47.155	46.571	45.911	45.173	
12	47.854	47.851	47.847	47.839	47.829	47.816	47.799	47.795	47.793	47.791	47.797	47.664	47.422	47.087	46.666	46.162	45.578	44.915	44.175	
13	46.738	46.734	46.729	46.72	46.708	46.693	46.675	46.671	46.668	46.666	46.673	46.543	46.305	45.972	45.551	45.046	44.46	43.794	43.051	
14	45.503	45.5	45.494	45.485	45.473	45.458	45.439	45.435	45.432	45.43	45.437	45.308	45.07	44.737	44.315	43.808	43.22	42.551	41.803	
15	44.155	44.152	44.146	44.137	44.125	44.109	44.09	44.087	44.084	44.081	44.088	43.958	43.719	43.385	42.96	42.451	41.858	41.185	40.433	
16	42.696	42.692	42.687	42.678	42.665	42.649	42.63	42.626	42.623	42.62	42.626	42.494	42.253	41.916	41.488	40.974	40.377	39.699	38.941	
17	41.126	41.123	41.117	41.108	41.095	41.079	41.059	41.055	41.052	41.049	41.052	40.918	40.673	40.331	39.899	39.38	38.777	38.093	37.329	
18	39.449	39.446	39.44	39.43	39.417	39.401	39.38	39.376	39.373	39.37	39.37	39.231	38.981	38.634	38.195	37.67	37.06	36.369	35.598	
19	37.669	37.665	37.659	37.649	37.635	37.618	37.597	37.593	37.589	37.586	37.582	37.436	37.179	36.824	36.378	35.845	35.228	34.528	33.748	
20	35.791	35.787	35.78	35.77	35.756	35.737	35.715	35.711	35.707	35.703	35.692	35.538	35.27	34.905	34.449	33.907	33.28	32.572	31.784	
21	33.823	33.819	33.812	33.801	33.785	33.766	33.742	33.737	33.733	33.729	33.708	33.539	33.256	32.876	32.41	31.858	31.219	30.499	29.709	
22	31.778	31.773	31.765	31.753	31.737	31.715	31.689	31.684	31.679	31.674	31.639	31.45	31.139	30.735	30.26	29.702	29.044	28.301	27.535	
23	29.669	29.664	29.656	29.643	29.625	29.602	29.573	29.567	29.561	29.555	29.504	29.283	28.923	28.468	28	27.458	26.766	25.918	25.292	
24	27.512	27.507	27.498	27.485	27.467	27.443	27.414	27.408	27.401	27.395	27.333	27.076	26.622	26.006	25.616	25.188	24.48	23	23	
25	25.305	25.301	25.295	25.285	25.27	25.251	25.227	25.222	25.217	25.212	25.166	24.923	24.353	23	23	23	23	23	23	

(Продолжение табл. 5)

n	m																								
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35									
1	47.76	46.889	45.947	44.935	43.853	42.703	41.486	40.204	38.858	37.451	35.985	34.466	32.898	31.289	29.65	27.994									
2	47.694	46.822	45.879	44.867	43.784	42.634	41.416	40.132	38.784	37.375	35.906	34.383	32.809	31.193	29.545	27.878									
3	47.494	46.621	45.677	44.663	43.579	42.425	41.204	39.916	38.564	37.148	35.671	34.136	32.547	30.91	29.231	27.525									
4	47.162	46.288	45.341	44.324	43.236	42.079	40.853	39.559	38.198	36.773	35.283	33.731	32.119	30.449	28.724	26.943									
5	46.698	45.821	44.872	43.851	42.759	41.596	40.364	39.062	37.692	36.254	34.749	33.177	31.539	29.833	28.06	26.23									
6	46.104	45.224	44.271	43.245	42.148	40.979	39.739	38.428	37.047	35.596	34.075	32.484	30.82	29.078	27.243	25.276									
7	45.38	44.496	43.539	42.508	41.405	40.229	38.981	37.66	36.268	34.804	33.268	31.659	29.977	28.216	26.372	24.493									
8	44.527	43.639	42.678	41.642	40.532	39.349	38.092	36.762	35.358	33.88	32.329	30.706	29.013	27.238	25.323	23									
9	44.472	43.584	42.622	41.586	40.476	39.292	38.035	36.704	35.299	33.821	32.269	30.645	28.951	27.178	25.27	23									
10	44.416	43.528	42.566	41.529	40.419	39.235	37.977	36.646	35.24	33.761	32.208	30.584	28.889	27.117	25.218	23									
11	44.36	43.472	42.509	41.473	40.362	39.177	37.919	36.587	35.181	33.701	32.147	30.521	28.827	27.057	25.166	23									
12	43.358	42.465	41.497	40.455	39.337	38.145	36.879	35.537	34.12	32.626	31.055	29.412	27.717	26.012	24.37	23									
13	42.23	41.332	40.359	39.31	38.186	36.987	35.713	34.363	32.936	31.428	29.833	28.148	26.399	24.663	23	23									
14	40.977	40.075	39.096	38.041	36.91	35.704	34.423	33.066	31.635	30.121	28.504	26.749	24.844	23	23	23									
15	39.602	38.694	37.709	36.647	35.51	34.296	33.007	31.646	30.218	28.724	27.135	25.327	23	23	23	23									
16	38.104	37.19	36.199	35.131	33.986	32.764	31.464	30.091	28.665	27.226	25.823	24.353	23	23	23	23									
17	36.486	35.565	34.567	33.494	32.343	31.111	29.793	28.385	26.909	25.46	24.364	23	23	23	23	23									
18	34.747	33.818	32.814	31.736	30.583	29.35	28.021	26.549	24.899	23	23	23	23	23	23	23									
19	32.888	31.949	30.936	29.853	28.708	27.491	26.214	24.727	23	23	23	23	23	23	23	23									
20	30.912	29.957	28.93	27.832	26.706	25.488	24.456	23	23	23	23	23	23	23	23	23									
21	28.826	27.842	26.797	25.629	24.601	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23									
22	26.652	25.593	24.608	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23									
23	24.491	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23									
24	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23									
25	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23									

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании проведено вычисление распределения температуры в малом объеме полусферической облучательной капсулы при неоднородном характере материала в ней с точностью до 10^{-3} К.

Результаты этого расчета позволяют уточнить поправки на влияние измерительной термопары.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ullmaier H. et al.* URAM-2: Irradiation Experiments at the Dubna IBR-2 Reactor. Report ESS 99-92-T. FZJ, July 1999.
2. *Shabalin E. P., Kulagin E. N., Kulikov S. A., Melikhov V. V.* Experimental Study of Spontaneous Release of Accumulated Energy in Irradiated Ices // *Rad. Phys. Chem.* 2003. V. 67, No. 3–4. P. 315–319.
3. *Kulikov S. A., Melikhov V. V., Shabalin E. P.* Study of Fast Neutron Irradiation Effects in Cold Moderator Materials // *Part. Nucl., Lett.* 2003. No. 5[114]. P. 82–88.
4. *Shabalin E. P., Kulagin E. N., Kulikov S. A., Melikhov V. V.* Radiation Effects in Cold Moderator Materials: Experimental Study of Accumulation and Release of Chemical Energy // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2004. V. 215. P. 181–186.
5. *Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М.* Численные методы. М., 2002.
6. *Вазов В., Форсайт Дж.* Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. М., 1983.
7. *Варгафтика Н. Б.* Теплофизические свойства веществ: Справ. М., 1979.
8. *Рихтмайер Р. Д.* Разностные методы решения краевых задач. М., 1960.

Получено 7 сентября 2004 г.

Редактор *О. Г. Андреева*

Подписано в печать 9.12.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,88. Уч.-изд. л. 1,2. Тираж 290 экз. Заказ № 54692.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/