УДК 539.17

ОБ ЭФФЕКТЕ САМОРАЗОГРЕВА ПЛУТОНИЯ-238 В ПРОСТЫХ ПО ГЕОМЕТРИИ СФЕРИЧЕСКИ-СИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМАХ

Н. Б. Бабичев, А. А. Севастьянов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Представлены результаты оценок температуры в однородном шаре и в сферически-симметричной оболочке, выполненных из чистого (без примесей) изотопа ^{238}Pu.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, температура, источник тепловой энергии.

Введение

Плутоний-238 характеризуется очень высокой скоростью реакции альфа распада и соответственно интенсивным удельным тепловыделением, равным q = 567,85 Вт/кг (см. [1]). Величина q для ^{238}Pu в 295 раз больше, чем в случае ^{239}Pu.

Цель данной статьи заключается в исследовании вопроса о тепловых состояниях шара и сферически-симметричной оболочки из ^{238}Pu.

Поставленная задача является стационарной.

1. Решение тепловой задачи для однородного шара из ^{238}Pu

Стационарное уравнение теплопроводности имеет следующий вид:

$$\mathrm{div}[\kappa(\vec{r},T)\mathrm{grad}T(\vec{r})] = -Q(\vec{r},T), \tag{1}$$

где $\kappa(\vec{r},T)$ – коэффициент теплопроводности, зависящий от координат и температуры T, $Q(\vec{r},T)$ – источник тепла (энергия, выделяющаяся в единице объема в единицу времени).

Для однородного шара, в котором действует источник тепла с не зависящей от координат и температуры постоянной интенсивностью Q_0, уравнение (1) превращается в соотношение:

$$\kappa(T)\nabla^2 T(r) = -Q_0, \tag{2}$$

здесь ∇^2 – оператор Лапласа, в сферической системе координат $\nabla^2 = \frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{d}{dr}\right)$.

Функция

$$T(r) = T_0 + \frac{Q_0 R}{3\alpha} + \frac{Q_0}{6\kappa}\left(R^2 - r^2\right) \tag{3}$$

представляет собой искомое решение, удовлетворяющее граничному условию

$$-\kappa \frac{dT(r)}{dr}\bigg|_{r=R} = \alpha\left(T_R - T_0\right). \tag{4}$$

Выше использованы следующие обозначения: α – коэффициент теплопередачи, вызванной конвективным теплообменом шара с окружающей средой, имеющей температуру T_0; T_R – температура на поверхности шара.

При решении задачи предполагалось, что температура окружающей среды $T_0 = 20$ °C и коэффициент теплопередачи $\alpha = 7\ \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (см. [2]).

В аналитических вычислениях для ^{238}Pu приняты следующие константы: плотность $\rho = 17000\ \text{кг}/\text{м}^3$, интенсивность источника тепла $Q_0 = q\rho = 9\,653\,450\ \text{Вт}/\text{м}^3$ и коэффициент теплопроводности $\kappa = 12\ \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (см. [3]).

Следует отметить, что в справочнике [4] приведено значение $\kappa = 8{,}2\ \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Таким образом, в настоящее время существует неопределенность в величине коэффициента теплопроводности плутония.

Приведем результаты аналитических вычислений.

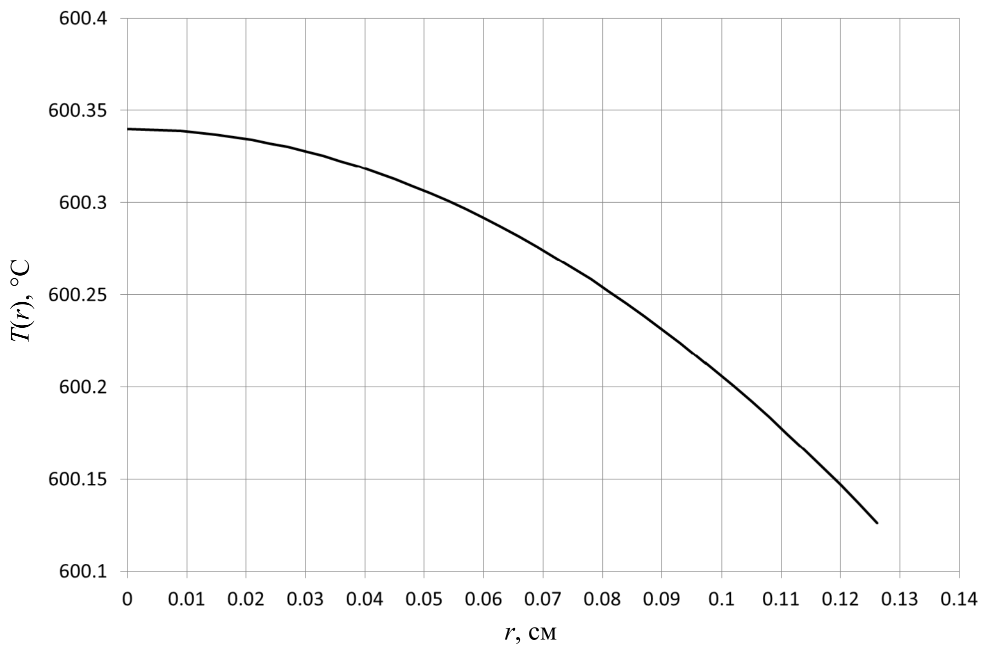

Рис. 1. Пространственное распределение температуры внутри шара из ^{238}Pu с массой $M_{\text{шара}} = 0{,}1431$ г и с радиусом $R = 0{,}1262$ см

Вычисленные по формуле (3) температуры в центре шара и на его границе составили $T(r=0) = 600{,}340$ °C, $T(r=R) = 600{,}126$ °C.

Отметим, что эти значения на 40 °C меньше температуры плавления плутония.

2. О саморазогреве однородного сферически-симметричного слоя

Будем предполагать, что под оболочкой находится однородное вещество, в котором не действуют источники тепла.

Требуется решить систему уравнений:

$$\frac{d^2T(r)}{dr^2} + \frac{2}{r}\frac{dT(r)}{dr} = 0 \text{ при } r \le R_1, \tag{5}$$

$$\frac{d^2T(r)}{dr^2}+\frac{2}{r}\frac{dT(r)}{dr}=-\frac{Q_0}{\kappa}\ \text{при}\ R_1\le r\le R, \tag{6}$$

где R_1 и R – соответственно внутренний и внешний радиусы оболочки.

Решение данной системы уравнений, удовлетворяющее граничным условиям, имеет следующий вид:

$$T(r)=\begin{cases} T_0+\dfrac{Q_0R}{3\alpha}\left[1-\left(\dfrac{R_1}{R}\right)^3\right]+\dfrac{Q_0R^2}{6\kappa}\left[1-3\left(\dfrac{R_1}{R}\right)^2+2\left(\dfrac{R_1}{R}\right)^3\right] & \text{при}\ r\le R_1; \\ T_0+\dfrac{Q_0R}{3\alpha}\left[1-\left(\dfrac{R_1}{R}\right)^3\right]+\dfrac{Q_0R^2}{6\kappa}\left[1-\left(\dfrac{r}{R}\right)^2-2\left(\dfrac{R_1}{R}\right)^3\left(\dfrac{R}{r}-1\right)\right] & \text{при}\ R_1\le r\le R. \end{cases} \tag{7}$$

Отметим, что в (7) не входит коэффициент теплопроводности вещества центральной области, т. е. решение данной двухобластной задачи не зависит от того, какое вещество находится под оболочкой.

В качестве примера рассмотрим оболочку с такой же, как в случае шара массой $M_{об}=0{,}1431$ г, и размерами, показанными на рис. 2.

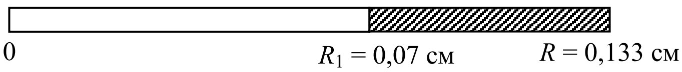

Рис. 2. Радиальный разрез двухобластной системы

Результаты вычислений по формуле (7) представлены на рис. 3.

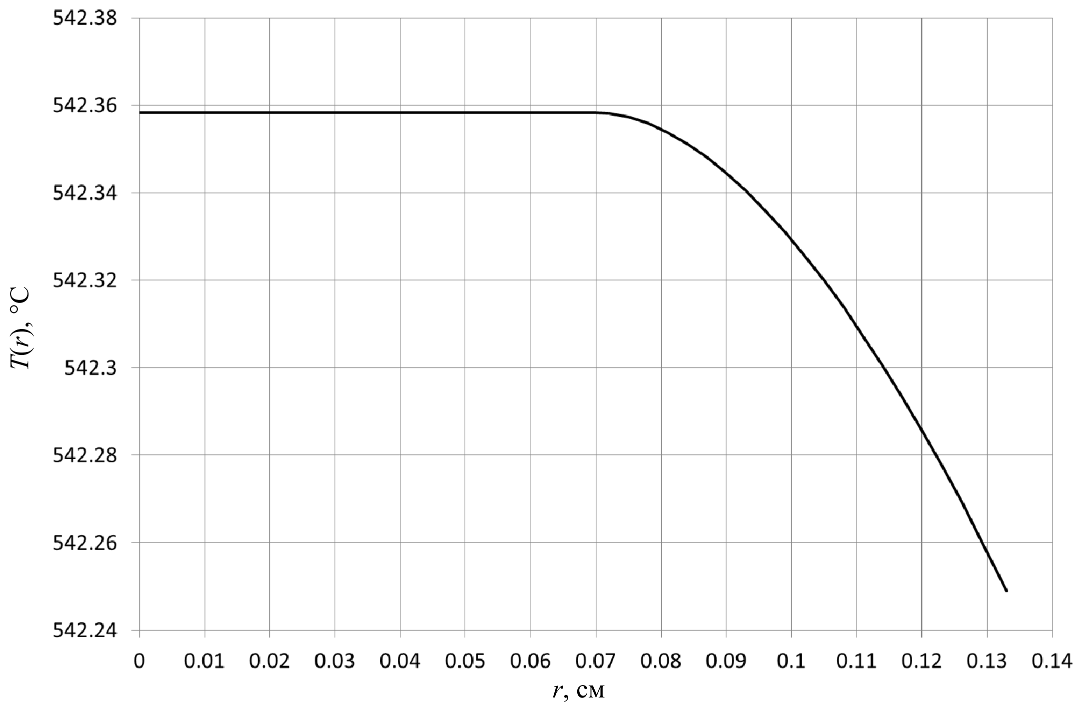

Рис. 3. Пространственное распределение температуры в двухобластной системе

В аналитических вычислениях реализовались следующие значения температур на границах оболочки $T(r=R_1)=542{,}358$ °C, $T(r=R)=542{,}249$ °C.

Заключение

В статье решена задача, поставленная во введении. Показано, что при переходе от шара к оболочке с сохранением массы плутония его температура уменьшается из-за увеличения площади внешней поверхности, через которую тепло поступает в окружающее пространство.

В шаре и в оболочке градиенты температур малы, т.е. они практически изотермичны.

Список литературы

1. Firestone R. B., Chu S. Y. F., Shiley V. S. Table of isotopes CD-ROM // Wiley-Interscience, 8-th Edition. Ver. 1.0. March 1996.

2. Отопление и вентиляция: Учебник для вузов в двух частях / Под ред. П. Н. Каменева, А. Н. Сканави, В. Н. Богословского, А. Г. Егиазарова, В. П. Щеглова. М.: Стройиздат, 1975.

3. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.

4. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

Статья поступила в редакцию 15.12.2014