

потребовать, чтобы максимальная энергонапряженность в оптимизируемом аппарате не превышала максимальной энергонапряженности в реакторе с равномерным распределением поглотителя, то выигрыш в значении функционала J уменьшится примерно вдвое. При этом в центре реактора появится зона теплотехнического ограничения.

Поступило в Редакцию 10/VI 1975 г.

УДК 539.12.08

Об оценке мощности дозы по радиационному нагреву образца в процессе облучения

БАЛАШОВ А. П., МАМОНТОВ А. М.

Для образца небольших размеров, облучаемого частицами или квантами высокой энергии, можно пренебречь неравномерностью энерговыделения и температурного поля. В условиях конвективного теплообмена потери тепла пропорциональны разности температур тела и окружающей среды в степени, близкой к единице [1]. Изменение температуры тела в процессе облучения можно описать уравнением

$$\frac{dT}{d\tau} + \frac{\lambda S}{\rho V} T^n = \frac{D}{c}, \quad (1)$$

где T — разность температур тела и окружающей среды ($T = 0$ при $\tau = 0$); τ — время облучения; D — мощность дозы, не меняющаяся со временем; c — удельная теплоемкость образца; ρ , S , V — плотность, площадь поверхности и объем образца; λ — коэффициент теплообмена.

Введем коэффициент $k = \lambda S / \rho V$, учитывающий размерность множителя T^n .

На начальной стадии облучения потери тепла пренебрежимо малы, и рост температуры происходит по линейному закону

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{D}{c}, \quad (2)$$

что позволяет оценить мощность поглощенной дозы излучения по экспериментально полученной скорости роста температуры [2].

При дальнейшем облучении потери тепла постепенно возрастают, скорости увеличения температуры стремится к нулю и максимальное ее значение определяется формулой (1) при $dT/d\tau = 0$. Мощность дозы можно найти из установившейся разности температур $T_{\max}$

$$D = k T_{\max}^n. \quad (3)$$

Для произвольного значения параметра n решение уравнения (1) запишем в неявном виде

$$c \int_0^T \frac{dT}{D - k T^n} = \tau, \quad (4)$$

которое определяет обратную зависимость $\tau = \tau(T)$; значение мощности дозы можно найти сравнением расчетной и экспериментальной зависимостей $\tau(T)$. Прак

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудик А. П. Оптимальное расположение ядерного горючего в реакторе. Сер. «Физика ядерных реакторов». Вып. 2. М., Атомиздат, 1974.
2. Понтрягин Л. С. и др. Математическая теория оптимальных процессов. М., «Наука», 1969.
3. Габасов Р., Кириллова Ф. М. Особые оптимальные управления. М., «Наука», 1973.

тически задача сводится к минимизации функции вида

$$\Phi = \frac{1}{\sum_{i=1}^m f_i} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\tau_i - R_i}{\tau_i} \right)^2 f_i, \quad (5)$$

где τ_i и R_i — экспериментальное и расчетное значение времени, за которое достигается разность температур T_i ; m — число экспериментальных точек; f_i — весовые множители, учитывающие «густоту» точек на экспериментальной кривой.

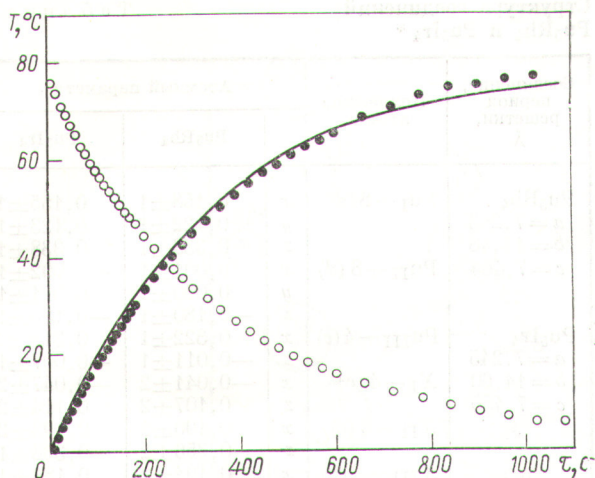
Значения $R_i(T_i)$ определяются из уравнения (4) численным интегрированием при известных параметрах n и k . Априорная оценка последних затруднена вследствие зависимости коэффициента теплообмена от многих факторов [1]. Анализируя кривую спада температуры образца после окончания облучения, несложно определить n и k . Процесс охлаждения описывается уравнением (1) при $D = 0$ и начальных условиях $T = T_0$ при $\tau = 0$. Решение имеет вид

$$T = T_0 \exp\left(-\frac{k}{c} \tau\right), \quad n = 1;$$

$$T = \left[T_0^{1-n} - \frac{(1-n)k}{c} \tau\right]^{1/(1-n)}, \quad n \neq 1. \quad (6)$$

Значение n можно найти подбором с помощью известных методов минимизации [3] функции, аналогичной (5). При этом значение k определяется методом наименьших квадратов посредством линеаризации экспериментальной зависимости $T(\tau)$ в соответствующих координатах.

Для оценки влияния экспериментальной погрешности на определяемые параметры решались контрольные задачи, в которых для заданных значений n , k T_0 строились кривые охлаждения $T(\tau)$ (20–30 точек) с внесенной случайной погрешностью 1–5%, распределенной по нормальному закону. Для определения параметров n и k полученные зависимости подвергались описанной обработке. Результаты расчетов свидетельствуют о заметном влиянии вносимых погрешностей на величину параметров теплообмена, вычисленных по небольшому числу «экспериментальных» точек. Однако было установлено, что эта погрешность очень слабо влияет на величину мощности дозы, определяемую в соответствии с уравнением (3), либо посредством про-



Изменение температуры образца со временем:

● — в процессе облучения; ○ — после прекращения облучения

педуры минимизации (5), что объясняется зависимостью мощности дозы от обоих параметров.

Предлагаемая методика оценки мощности дозы была опробована в серии экспериментов. Алюминиевый образец с размерами $10 \times 15 \times 30$ мм облучался электронами с энергией 8,5 МэВ со стороны широкой грани в условиях естественного конвективного теплообмена. Для измерения температуры в процессе облучения применялись платиновый термометр сопротивления, приклеенный к одной из граней образца, и цифровой вольтметр. Погрешность определения температуры не превосходила $0,3^\circ\text{C}$. Плотность тока электронов j определялась цилиндром Фарадея с относительной погрешностью 3–7%. Стабильность тока пучка контролировалась индукционным датчиком.

На рисунке представлены типичные кривые нагрева и охлаждения исследуемого образца, соответствующие плотности тока $0,1 \text{ мкА/см}^2$. Расчетная кривая нагрева (сплошная линия) согласуется с экспериментальными значениями температуры с погрешностью $< 4\%$; при охлаждении расчетные значения практически совпадают с экспериментальными (на рисунке опущены).

Некоторые результаты анализа температурных кривых при различной плотности тока представлены в таблице. Экспериментально найдено, что при выборе показателя степени $n = 1,085$ расчетные кривые охлаждения согласуются с измеренными с погрешностью не более 4%.

Выбор постоянного значения n обеспечивает относительно слабый разброс параметра k , зависящего от

Результаты анализа радиационного нагрева образца при облучении электронами с энергией 8,5 МэВ

$j, \text{ мкА/см}^2$	$k \times 10^4, \text{ эрг/(с}^\circ\text{C)}$	$D_1 \times 10^4, \text{ рад/с}$	$D_2 \times 10^4, \text{ рад/с}$
0,033	1,92	0,64	0,68
0,067	1,75	1,42	1,43
0,083	1,99	1,67	1,90
0,100	1,72	1,68	1,96
0,117	1,51	2,52	2,42
0,130	1,91	2,23	2,57
0,133	1,30	2,75	2,65

коэффициента теплообмена. Значения мощности дозы D_1 получены из начального участка кривых нагревания в соответствии с формулой (2), значения D_2 — из анализа всей совокупности экспериментальных точек по предлагаемой методике. Зависимость D_2 от плотности тока электронов характеризуется небольшими отклонениями от линейности (максимальное отклонение $< 12\%$), тогда как аналогичная зависимость $D_1(j)$ отличается сравнительно большим разбросом значений, особенно при высоких плотностях тока.

Предлагаемый метод дозиметрии, основанный на анализе радиационного нагрева тел в процессе облучения, позволяет получить независимую оценку мощности дозы излучения, поглощенной непосредственно в изучаемом объекте. Он может быть использован при исследованиях в области радиационной физики и материаловедения. Для известной мощности дозы полученные результаты позволяют предсказать кинетику изменения температуры объекта в процессе облучения. Необходимые для этого параметры теплообмена можно заранее определить из тепловых экспериментов. Следует отметить, что возможность применения изложенного метода ограничена условиями малости потерь тепла на излучение. Если лучистый теплообмен преобладает, то можно воспользоваться результатами работы [4], в которой исследованы закономерности радиационного разогрева твердых тел в вакууме.

Поступило в Редакцию 18/VII 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карслуэ Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М., «Наука», 1964.
2. Ананьев В. Д., Матора И. М. «Атомная энергия», 1970, т. 29, вып. 4, с. 285.
3. Уайлд Д. Дж. Методы поиска экстремума. М., «Наука», 1967.
4. Ибрагимов Ш. Ш., Реутов В. Ф., Абрашитов И. Ю. «Изв. АН КазССР. Сер. физ. мат.», 1974, № 6, с. 84.

УДК 548.73

Кристаллическая структура соединений Pu_5Rh_4 и Pu_5Ir_4

БЕЗНОСИКОВА А. В., ЧЕБОТАРЕВ Н. Т., ЛУКЬЯНОВ А. С., ШАПОВАЛОВ М. П., ТИМОФЕЕВА Л. Ф.

Исследовались монокристаллы соединений Pu_5Rh_4 и Pu_5Ir_4 методом Лауэ, колебания и фотографирования обратной решетки (излучение молибденовое). Интенсив-

ности отражений оценивались визуально по маркам чернения с учетом факторов Лоренца и поляризационного. Для соединений Pu_5Rh_4 и Pu_5Ir_4 было использова-